

CARLOS ALBERTO DE ALMEIDA PIMENTEL

**FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS A QUENTE
CONTRIBUIÇÃO PARA UM NOVO MÉTODO DE FORMULAÇÃO**

Orientadores:

Ana Cristina Freire

Luís Quaresma

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Faculdade de Engenharia

Lisboa

2013

CARLOS ALBERTO DE ALMEIDA PIMENTEL

**FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS A QUENTE
CONTRIBUIÇÃO PARA UM NOVO MÉTODO DE FORMULAÇÃO**

Dissertação apresentada para obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Civil no Curso de
Mestrado em Engenharia Civil conferido pela
Universidade Lusófona de Humanidades e
Tecnologias

Orientador: Doutora Ana Cristina Freire

Coorientador: Professor Luís Quaresma

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Faculdade de Engenharia

Lisboa

2013

A minha intuição levou-me a tentar entrar numa história muito antiga, alterar seu conteúdo e reescrever as páginas que durante tantos anos a enalteceram. O novelo proposto a desenrolar afinal não era assim tão longo, mas agora para formar um outro, muito mais linha terá que ser preciso produzir.

Aos meus Pais, à minha filha e a “Ti”.

AGRADECIMENTOS

Estas foram as últimas palavras escritas desta dissertação, e ao escrevê-las senti, simultaneamente, serem as mais difíceis e também aquelas que poderão expressar alguma ingratidão pontual. Nunca por esquecimento, mas simplesmente provocada pela dificuldade de acesso ao arquivo da minha memória, onde certamente estarão alguns ilustres “Anónimos”.

A apresentação deste trabalho é realizada ao abrigo do Protocolo de Cooperação entre o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e a Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias (ULHT). Teve a orientação da Engenheira Ana Cristina Ferreira de Oliveira Rosado Freire, Investigadora Auxiliar do LNEC e o Engenheiro Luís Manuel Trindade Quaresma, Professor da HLHT.

A realização deste trabalho só foi possível pelos meios postos à disposição pela Direção do Laboratório Nacional de Engenharia Civil na pessoa do Eng^o Carlos Alberto de Brito Pina Investigador Coordenador, Presidente do LNEC, e pela Chefia do Núcleo de Infraestruturas Rodoviárias e Aeroportuárias (NIRA), na pessoa da Doutora Eng^a Ana Cristina Ferreira de Oliveira Rosado Freire, a quem desejo expressar os meus agradecimentos, pelas importantes sugestões e apoio no desenvolvimento deste trabalho, e ainda pela leitura crítica e construtiva do original.

Embora muita da produção de um trabalho desta natureza resulte de horas solitárias diante dum computador a escrever e compor, nada se faz sozinho. É sempre no diálogo com os outros que se constroem as ideias e se realiza o trabalho. Agradecer-lhes, é reconhecer a sua importância nas minhas realizações. Por isso minha profunda gratidão:

- Ao meu Orientador, Professor Luís Quaresma, pela amizade e por permitir este convívio numa das experiências determinantes da minha formação académica, profissional e pessoal.
- Ao meu grande Amigo Professor Doutor Manuel Fonseca (em memória), com quem não conseguirei partilhar a alegria e o orgulho de ter terminado. Senti sempre que o meu percurso académico era seguido por ti em silêncio e à distância. Fomos colegas de trabalho, adversários no desporto e acabaste por ser meu Docente. Onde quer que estejas, que seja reconhecida a grandeza do teu coração. Obrigado Amigo Manel.
- Aos Amigos e colegas do NIRA, Anabela Maia, Daniel Fernandes, Eduardo Coimbra, João Costa, José Reimão, Nuno Nunes, Pedro Domingos e Simona Fontul, pela, Amizade, companheirismo, apoio, incentivo constante e disponibilidade para diversas

trocas de impressão sobre o trabalho que decidi empreender. Todos foram simplesmente Muito Amigos.

Particularmente ao Amigo e colega Nuno Nunes, companheiro de muitas reflexões e destinos, sinto dificuldade em expressar a alegria e a sorte de ter por perto alguém que ajudou a pensar, decidir e caminhar na conclusão deste trabalho. Poderias ter sido irmão, filho, vizinho, colega, mas na verdade foste um muito de tudo. Daí que todos os agradecimentos serão necessariamente insuficientes e que estas palavras sirvam, pelo menos, para lembrar o quanto foi fantástico conviver em tantos e significativos momentos, com alguém tão Especial e Amigo como tu.

- Às oficinas de mecânica do LNEC nas pessoas Amigas do Rogério, Paulo e Moura pela disponibilidade e empenho sempre demonstrados quando os mais diversos tipos de SOS lhes foram apresentados.
- À Unidade de Metrologia de Forças (UMF) do LNEC, na pessoa Amiga do seu Técnico José Augusto Barreiros, sempre disponível na verificação das condições de aplicação de forças dos equipamentos utilizados na realização do presente trabalho.
- Ao Arnaldo Heitor, Amigo de infância, vizinho na aldeia e que crescemos profissionalmente lado a lado na mesma área. Mesmo longe, em Angola, disponibilizou os seus conhecimentos e experiências através das tecnologias online.
- Ao Amigo Nuno Januário pelo excelente trabalho fotográfico.
- Ao Laboratório de Engenharia Civil da ULHT, na pessoa Amiga do Engenheiro Pedro Ramos, pela sua disponibilidade e por facilitar o uso dos equipamentos utilizados na caracterização dos agregados.
- Aos velhos Amigos do curso que formaram o meu grupo de estudo, Joaquim Véstia, Luís Lopes, Nuno Nunes, Nuno Patriarca, Nuno Pereira, Paulo Pereira, Ricardo Magalhães e Tiago Rodrigues. Mesmo distantes ou dispersos, vocês são para mim exemplos de uma Amizade incondicional e perene, Companheirismo e espírito de Entreajuda. Vocês fizeram parte da bengala que me ajudou a caminhar entre 2008 e 2013.
- À empresa de construções Alves Ribeiro, S.A., nas pessoas do Engenheiro Luís Valente e do Técnico João Paulo Cruz sediados no estaleiro da quinta do Gradil em Camarate. A assistência técnica prestada foi simplesmente excelente, caracterizada por: acesso ao estaleiro, recolha de documentação escrita e digital, recolha de materiais, amostras e informações recolhidas em obra.

- À Vögele na pessoa do Engenheiro Rui Faustino pela gentileza e disponibilidade de me fazer chegar dados técnicos de equipamentos, que se verificaram ser elementos técnicos indispensáveis para a realização do meu trabalho.
- Ao departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho nas pessoas de Professor Jorge Carvalho Pais e Engenheiro Carlos Palha toda a disponibilidade na utilização equipamentos que permitiram a aquisição de dados imprescindíveis, que complementaram as conclusões deste trabalho.

Finalmente, e talvez aqueles por onde deveria ter começado os agradecimentos, a minha família. Eles são, sem sombra de qualquer dúvida, a base mais sólida e importante da minha vida e deste trabalho.

Aos meus Queridos Pais, José e Mercedes, que apesar de sempre me dizerem *“para que é isso rapaz?”*, sinto que têm orgulho, o que me faz feliz e alegre meu coração. O meu grau académico não saiu na hora que vocês sempre desejaram, saiu num imprevisto do tempo mas, o importante é que que saiu e vocês viram. Se estive certo ou errado nunca o iremos saber.

À minha Adorada Filha Inês que sempre com Carinho me tratou por “Velhote”, soube abdicar com Carinho da minha presença e sempre pronunciou com Amor e um orgulho indiscreto “este é o meu Pai!”.

À Mulher, Amiga, Companheira e Dedicada Käs, pelo seu Amor, Carinho, apoio e pelo seu inteligente saber de deixar-me só, presenteando-me sempre com a sua presença.

A estas quatro pessoas maravilhosas da minha vida, o agradecimento profundo por saberem compreender as minhas dificuldades e a minha longa ausência nestes anos. A sua compreensão ao meu querer e às minhas dificuldades, foi manifestada sempre com constantes palavras de ânimo e total confiança no meu sucesso. Foram elas os quatro pilares que suportaram a complicada laje que eu tinha que edificar. Sou feliz por simplesmente saber que vocês existem em minha vida.

O que talvez vocês nunca tivessem adivinhado ou previsto, é que eu faria da curiosidade teimosia, e do desejo de conhecer mais e de experimentar toda novidade académica, um doce complemento de minha profissão.

Enfim, agradeço a todos que, mesmo não sabendo que o fizeram, contribuíram para que eu terminasse esta dissertação.

RESUMO

O interesse do presente estudo prende-se com o facto das características mecânicas duma mistura betuminosa serem influenciadas pelo tipo de compactação utilizado no estudo de formulação.

Deste modo, pretende-se contribuir para o desenvolvimento do método de formulação de misturas betuminosas fabricadas a quente, simulando as condições de compactação em obra.

O principal desafio do presente estudo foi o de comparar a tradicional formulação pelo método Marshall com uma proposta de formulação utilizando o compactador de rolo, baseada no desempenho mecânico das misturas betuminosas.

A formulação laboratorial adequada deverá incorporar um equilíbrio das propriedades relacionadas com o desempenho, para seleccionar os componentes duma mistura específica a aplicar em obra.

Mais do que determinar a composição ótima duma mistura betuminosa, um método de formulação baseado no desempenho, procura avaliar e assegurar níveis adequados das características mecânicas duma mistura betuminosa em serviço.

Foram determinadas experimentalmente as propriedades relacionadas com o desempenho das misturas estudadas como, módulo de deformabilidade, fendilhamento por fadiga e deformação permanente.

Neste estudo propõe-se um novo método de formulação baseado no desempenho, como alternativa viável ao método Marshall, mostrando as suas vantagens, após validação do método por comparação das características obtidas em provetes compactados em laboratório e colhidas em obra.

Palavras-chave:

Misturas betuminosas, método Marshall, compactação, compactador de rolo, formulação baseada no desempenho.

ABSTRACT

The main purpose of this study is related to the fact that mechanical characteristics of a bituminous mixture are influenced by the type of compaction used in the study of mix design.

Thus, this study intends to contribute to the development of methodologies for design of hot mixed asphalt, simulating in situ compaction conditions.

The major challenge of this study was the comparison between the traditional mix design according to the Marshall method and a proposed mix design using a new compaction procedure, the roller compactor, based on the mechanical performance of asphalt mixtures.

A proper laboratory mix design should integrate a balanced consideration of the asphalt mixture performance related properties, in order to select the components of a specific asphalt mixture to be applied.

Rather than determining an optimal composition of an asphalt mixture, a performance-based mix design method, seeks to assess and guarantee proper mechanical characteristics of an asphalt mixture during service condition.

Performance-based characteristics of the studied asphalt mixtures, such as deformability modulus, fatigue and permanent deformation behaviour were experimentally determined in laboratory

A new mix design method, based on performance, is proposed in this study, as a feasible alternative to the Marshall method. The proposed method and its main advantages were validated by comparing performance related characteristics of in situ collected samples and laboratory produced samples.

Keywords :

Asphalt mixtures, Marshall method, compaction, roller compactor, performance-based formulation.

SIMBOLOGIA

EPI Equipamento de Proteção Individual

E Módulo de deformabilidade

E_{20°C} Módulo de deformabilidade à temperatura de 20°C

E_T Módulo de deformabilidade à temperatura T

I_{Pen} Índice de penetração do betume

pen₂₅ Penetração do betume a 25°C

γ_{bet} Massa volúmica do betume

γ_{bf} Baridade imersa

γ_{mtf} Baridade Máxima Teórica

n Porosidade

T_{vb} Teor volumétrico em betume

P_b Percentagem de betume

T Temperatura

T_{ab} Temperatura de amolecimento do betume

T_{mb} Temperatura média mensal

V_a Percentagem volumétrica de agregados

V_b Percentagem volumétrica de betume

VMA Volume de vazios no esqueleto da mistura compactada

ε_f Extensão de fadiga

V Coeficiente de Poisson

ABREVIATURAS

ULHT Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

LNEC Laboratório Nacional de Engenharia Civil

JAE Junta Autónoma de Estradas

IEP Instituto de Estradas de Portugal

INIR Instituto de Infraestruturas Rodoviárias

EN Norma Europeia

EP - Estradas de Portugal, SA

NP Norma Portuguesa

CEEP Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2012)

EUA Estados Unidos da América

MBQ Mistura betuminosa a quente

BB Betão Betuminoso

SSD Saturated Surface Dry

BMT Baridade Máxima Teórica

BTDC *Bitumen Test Data Chart*

LCPC Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

SGP Sistema de Gestão de Pavimentos

FRE Folhas de registo de ensaios

NA Anexo Nacional

ÍNDICE DE TEXTO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Métodos de formulação utilizados neste trabalho	5
1.4	Estrutura da dissertação	7
2	FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS.....	9
2.1	Considerações gerais	9
2.2	Misturas betuminosas a quente	9
2.2.1	Constituintes de uma mistura betuminosa	10
2.3	Tipos de misturas betuminosas a quente.....	14
2.4	Principais métodos de formulação	15
2.4.1	Método tipo receita	15
2.4.2	Métodos de formulação empíricos	16
2.4.3	Métodos de formulação analíticos.....	17
2.4.4	Métodos de formulação volumétricos.....	17
2.4.5	Métodos de formulação relacionados com o desempenho.....	18
2.4.6	Métodos de formulação baseados no desempenho	18
2.5	Métodos de compactação.....	19
2.5.1	Compactador de impacto	19
2.5.2	Método Duriez	20
2.5.3	Compactador giratório	21
2.5.4	Compactador Kneading.....	23
2.5.5	Compactador de rolo	25
2.5.6	Compactador vibratório	27
3	ESTUDO EXPERIMENTAL - COMPACTAÇÃO.....	29

3.1	Considerações gerais	29
3.2	Seleção de materiais	29
3.2.1	Tipo de mistura	29
3.2.2	Seleção dos agregados	30
3.2.3	Granulometrias dos agregados	31
3.2.4	Percentagem dos agregados na composição da mistura	33
3.2.5	Seleção do betume	35
3.3	Estudo Marshall	36
3.3.1	Requisitos	36
3.3.2	Percentagens de betume	37
3.3.3	Ensaio de caracterização do betume	38
3.3.4	Composição “farmacêutica” dos provetes Marshall	39
3.3.5	Fabrico dos provetes Marshall	41
3.3.6	Ensaio de caracterização física dos provetes Marshall	43
3.3.7	Determinação da percentagem ótima de betume	47
3.4	Estudo com o compactador de rolo	51
3.4.1	Procedimento de compactação	51
3.4.2	Materiais ensaiados	55
3.4.3	Preparação de amostras para a caracterização mecânica	55
3.4.4	Caraterização das lajetas moldadas	59
4	ESTUDO EXPERIMENTAL – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	61
4.1	Considerações Gerais	61
4.2	Ensaio de wheel tracking (WTT)	62
4.3	Módulo de rigidez	64
4.3.1	Determinação efetuada a temperatura constante de 20°C	65
4.3.2	Determinação efetuada com variação de temperatura; 10°C, 20°C, 30°C e 40°C	68
4.4	Resistência ao fendilhamento por fadiga	70
4.5	Módulo de rigidez por tração indireta	72
4.6	Resistência conservada	75

4.6.1	Provetes moldados com o compactador de impacto	76
4.6.2	Carotes extraídas das lajetas moldadas com o compactador de rolo	77
4.7	Sensibilidade à água	77
4.7.1	Provetes moldados com o compactador de impacto	79
4.7.2	Carotes extraídas das lajetas moldadas com o compactador de rolo	79
4.8	Comparação fotográfica em carotes cortadas.....	81
4.9	Proposta dum novo Estudo de formulação	82
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
5.1	Principais conclusões	87
5.2	Recomendações para trabalhos futuros	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Constituição tipo de uma mistura betuminosa	10
Figura 2 – Diagrama BTDC, adaptada de (Azevedo, 1993)	13
Figura 3 – Compactador de impacto e moldes Marshall.....	20
Figura 4 – Prensa multiusos e conjunto de moldagem Duriez.....	21
Figura 5 – Compactador giratório.....	22
Figura 6 – Diagrama do movimento de compactação do provete (EN 12697-31).....	23
Figura 7 – Compactador <i>Kneading</i>	24
Figura 8 – Compactador de rolo e esquema de aplicação de forças	25
Figura 9 – Controlador de pressão e controlador de número de passagens por pressão....	26
Figura 10 – Compactador vibratório	28
Figura 11 – Recolha dos agregados no estaleiro	30
Figura 12 – Aspeto panorâmico da sala de caracterização de solos e agregados	31
Figura 13 – Esquartelamento, lavagem e peneiração mecânica a seco dos agregados.....	32
Figura 14 – Análise e curvas granulométricas dos agregados utilizados	32
Figura 15 – Determinação de uma das possíveis curvas granulométricas	34
Figura 16 – Armazenamento do betume em latas de 0,5 e 1,0 litro.....	36
Figura 17 – Ensaio de caracterização do betume. Penetração e de Anel e Bola.....	39
Figura 18 – Separação por frações de todos os agregados	39
Figura 19 – Granulometria composta. Separação de frações e curva granulométrica.....	40
Figura 20 – Composição “farmacêutica” dos provetes e conjuntos preparados.....	41
Figura 21 – Aspeto panorâmico da sala de ensaios de misturas betuminosas.....	42
Figura 22 – Exemplo do controlo de temperaturas de estufas e manta elétrica.....	43
Figura 23 – Sequência do fabrico dos provetes Marshall	44
Figura 24 – Determinação da baridade imersa e apresentação de resultados	44
Figura 25 – Banho-maria e controlo da temperatura	45

Figura 26 – Ensaio de rotura Marshall e resultados	46
Figura 27 – Determinação da BMT experimental e resultados	47
Figura 28 – Características gráficas dos provetes Marshall	50
Figura 29 – Verificação da força aplicada pelo compactador de rolo.....	52
Figura 30 – Sequência de fabrico duma lajeta com o compactador de rolo.....	56
Figura 31 – Determinação da baridade imersa e apresentação de resultados das lajetas moldadas (405×305×63)mm	57
Figura 32 – Aspeto dos vários tipos de lajetas fabricadas e identificação da finalidade dos provetes	57
Figura 33 – Corte dos provetes por serragem	58
Figura 34 – Carotagem das lajetas e aspeto da manga com diâmetro Marshall.....	58
Figura 35 – Resultados gráficos dos ensaios efetuados às lajetas (405×305×63)mm.....	59
Figura 36 – Baridades, Porosidade e VMA obtidas por aplicação do método Marshall e do compactador de rolo	60
Figura 37 – Ensaio de resistência à deformação permanente (WTT)	62
Figura 38 – Registo da evolução do PRD_{air} e WTS_{air}	63
Figura 39 – Características gráficas dos ensaios WTT	64
Figura 40 – Equipamento para testar a resistência ao fendilhamento por fadiga.....	65
Figura 41 – Conjunto de vigas para ensaios a 10Hz e 20°C	66
Figura 42 – Módulo de rigidez inicial. Registo do ensaio e resultado tipo.....	66
Figura 43 – Características gráficas do Módulo de rigidez e Angulo de fase.....	67
Figura 44 – Evolução do valor do módulo com o aumento da temperatura e frequência.....	69
Figura 45 – Fadiga. Registo do ensaio e resultado tipo.....	70
Figura 46 – Resultados gráficos dos ensaios de fadiga	71
Figura 47 – Equipamento tipo de ensaio e suporte de provetes.....	72
Figura 48 – Tipo de carregamento aplicado	73
Figura 49 – Amostras ensaiadas por diferentes processos de fabrico.....	73
Figura 50 – Equipamento de ensaio e sistema de aquisição de dados	73

Figura 51 – Esquema do princípio de ensaio e curvas tipo da força e deformação	74
Figura 52 – Valores do módulo de rigidez obtidos sobre provetes compactados pelos três métodos de compactação	75
Figura 53 – Corte de provetes cilíndricos	81
Figura 54 – Gráfico WTS_{air} (Ensaio de WTT)	84
Figura 55 – Gráfico das porosidades e intervalos impostos pelo CEEP	84
Figura 56 – Evolução do módulo e fadiga com a percentagem de betume	85

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Designação das misturas betuminosas (NP EN 13108-1 Anexo A).....	14
Quadro 2 – Correlação pressões/forças para o compactador de rolo utilizado.....	27
Quadro 3 – Mistura Betuminosa utilizada nos estudos (EP, 2012).....	29
Quadro 4 – Requisitos para o fuso granulométrico (EP, 2012).....	33
Quadro 5 – Características técnicas do betume utilizado.....	35
Quadro 6 – Requisitos e propriedades da mistura (EP, 2012).....	37
Quadro 7 – Dosagens dos provetes tipo “farmacêutica”.....	40
Quadro 8 – Informação técnica da fabricante relativa às várias temperaturas	42
Quadro 9 – Resumo dos resultados médios dos ensaios aos provetes Marshall	49
Quadro 10 – Conversão dos valores da pavimentadora para o compactador de rolo.....	53
Quadro 11 – Conversão de valores dos cilindros para o compactador de rolo.....	54
Quadro 12 – Resumo dos resultados médios dos ensaios das lajetas moldadas.....	59
Quadro 13 – Resultados dos ensaios de WTT	63
Quadro 14 – Resultados médios dos ensaios de Módulo de rigidez inicial.....	67
Quadro 15 – Variação do Módulo e Angulo de fase com a temperatura	68
Quadro 16 – Resumo dos resultados obtidos com os ensaios de fadiga.....	71
Quadro 17 – Valores relativos a cada um dos provetes ensaiados	74
Quadro 18 – Resumo dos valores obtidos no ensaio de resistência conservada	76
Quadro 19 – Resumo dos valores obtidos no ensaio de resistência Conservada	77
Quadro 20 – Resumo dos valores obtidos no ensaio Sensibilidade à água (Marshall).....	79
Quadro 21 – Resumo dos valores obtidos no ensaio Sensibilidade à água (Carotes).....	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A formulação de Misturas Betuminosas a Quente (MBQ) resulta da necessidade de se tentar controlar e otimizar as proporções ponderais dos materiais constituintes, garantindo um comportamento adequado para a aplicação pretendida. A formulação consiste assim num processo de otimização da composição de vários tipos de agregados, da sua dimensão nominal máxima da granulometria, assim como na definição de qual o tipo betume a usar e da percentagem que melhor se adapta à curva granulométrica definida.

Uma combinação ótima de agregados será aquela em que a composição das proporções obtidas daqueles materiais está dentro de um ajuste tão aproximado quanto possível da granulometria ideal, resultante de um fuso granulométrico pré estabelecido.

A aplicação de MBQ deve ser precedida por ensaios que permitam a obtenção duma percentagem de ligante que assegure uma boa durabilidade, uma boa resistência às ações mecânicas, boas características no desempenho funcional e estrutural e um índice de vazios na mistura adequado de forma a evitar a exsudação de betume.

A dosagem de ligante não deverá ser em excesso, pois proporcionará superfícies escorregadias, e também não pode ser insuficiente, pois dará origem à desagregação prematura da mistura.

As propriedades a adquirir variam com o tipo de pavimento, com o tipo de camada e até com o método de formulação usado. Assim, as misturas betuminosas colocadas nas camadas de pavimentos podem diferir no tipo de agregados, na sua granulometria, no tipo e na quantidade de ligante, na utilização de aditivos ou agentes que modificam o betume, e na sua composição volumétrica.

A necessidade de garantir um bom desempenho das misturas betuminosas após aplicação no pavimento tornou-se evidente, em especial a partir de meados do século XX, resultado de um crescente aumento da agressividade do tráfego, em termos de cargas, volume e velocidades de circulação (OSU, 2012).

Associado ao aumento crescente da agressividade do tráfego verifica-se, simultaneamente, um crescente aumento das exigências, traduzidas por uma maior preocupação com a segurança, o conforto e a economia da circulação, assim como

uma maior necessidade de manutenção com a melhor relação custo/benefício, associada a crescentes preocupações ambientais. Estes agentes catalisadores associados a uma crescente compreensão do comportamento das misturas betuminosas expuseram de forma irreversível a necessidade de desenvolver novos métodos de formulação associados a novos tipos de ensaios passíveis de avaliar o desempenho das MBQ.

No presente trabalho, foram comparados dois métodos de formulação distintos, um método empírico e um método baseado no desempenho das MBQ. Os dois métodos diferenciam-se pelo método de compactação aplicado às misturas e pelos parâmetros resultantes dos ensaios laboratoriais da avaliação das características finais das misturas assim formuladas. Os dois métodos de compactação utilizados no presente estudo foram o compactador de impacto Marshall e o compactador de rolo, usualmente designado como *roller-compact*.

O método Marshall foi o método de formulação, de natureza empírica, utilizado que, apesar de apresentar inconvenientes como a limitação da máxima dimensão dos agregados e um método de compactação desajustado à realidade verificada durante a compactação em obra, é o mais utilizado na maioria dos países. A sua utilização deve-se, em grande parte, à sua simplicidade e à aplicação de uma técnica simples de execução, com custos reduzidos, assim como à elevada experiência que foi sendo adquirida a nível mundial em resultado de uma longa experiência. Sendo um método empírico, apenas permite avaliar o comportamento de uma dada mistura betuminosa, não permitindo determinar as propriedades intrínsecas dos materiais constituintes, ou seja, as que permitem avaliar o desempenho de uma MBQ, através das suas propriedades fundamentais.

Assim, a escolha do método de formulação é considerada como um procedimento fundamental para a garantia, não apenas de um comportamento adequado durante o fabrico e aplicação de uma MBQ, mas também de um adequado desempenho das misturas para a aplicação pretendida. Esse desempenho irá influenciar globalmente o comportamento estrutural e funcional do próprio pavimento ao longo da sua vida útil.

O propósito do desenvolvimento de um novo método de formulação apoia-se nos métodos de avaliação das propriedades fundamentais do conjunto dos materiais das misturas betuminosas. Estes métodos são geralmente designados por métodos fundamentais ou racionais por se apoiarem na avaliação das propriedades fundamentais dos materiais, ou seja, nas propriedades que interessam aos métodos

de dimensionamento mais utilizados, designadamente o módulo de deformabilidade, a resistência à fadiga e a resistência à deformação permanente.

Assim procurou-se, no presente estudo, entender como é que o método de compactação adotado na formulação das misturas betuminosas influencia as propriedades mecânicas das misturas e, conseqüentemente o desempenho mecânico e funcional dos pavimentos que resultam da sua aplicação.

Com este trabalho, pretende-se contribuir para o estudo de novos métodos de formulação cuja utilização permita formular misturas betuminosas, usando critérios baseados nas propriedades fundamentais dos materiais.

Neste contexto pretende-se determinar uma percentagem de betume que maximize as diversas exigências requeridas para uma dada mistura betuminosa, a qual terá uma determinada aplicação e finalidade.

No âmbito do presente trabalho, considera-se pertinente enumerar os diferentes métodos de formulação usualmente utilizados, referenciando vantagens e desvantagens e a sua eventual aplicação na formulação de misturas betuminosas do tipo que se propõe no presente trabalho.

1.2 OBJETIVOS

Os métodos de formulação de misturas betuminosas têm como objetivo determinar a melhor combinação ponderal de agregados e de ligante betuminoso numa mistura, de tal modo que se obtenha um material de pavimentação tão económico quanto possível e que apresente um bom desempenho tendo em atenção as solicitações a que será sujeito, quer durante as operações de fabrico e de aplicação, quer após a sua entrada em serviço. Uma mistura deverá apresentar as seguintes características: ser fácil de fabricar e de colocar em obra, suportar os efeitos das cargas e das ações climáticas ao longo do tempo que estiver em serviço no pavimento, ter uma percentagem de vazios que, simultaneamente, lhe permita evitar exsudação do betume e a compactação posterior à sua entrada em serviço e apresentar uma quantidade de ligante que assegure a coesão e a durabilidade do pavimento.

Assim, as misturas colocadas nas camadas dos pavimentos podem diferir no tipo de agregado e na sua granulometria, no tipo e na quantidade de ligante, na utilização de aditivos ou agentes que modificam o betume, e na sua composição volumétrica.

Nos últimos anos tem-se verificado um grande esforço de investigação na procura de novos métodos de formulação cuja utilização permita formular misturas betuminosas a quente (MBQ), usando critérios baseados nas propriedades fundamentais dos materiais que as constituem. Estes métodos são geralmente designados por métodos racionais por se apoiarem na avaliação das propriedades fundamentais dos materiais, ou seja, naquelas que interessam aos métodos de dimensionamento, designadamente o módulo de deformabilidade, a resistência à fadiga e a resistência à deformação permanente.

Com o desenvolvimento de novos métodos de formulação procura-se, entender como é que a formulação influencia as propriedades mecânicas das misturas e o desempenho mecânico e funcional dos pavimentos que resultam da sua aplicação.

Com o desenvolvimento e aplicação do acervo normativo europeu, surgiram novos tipos de equipamentos associados à realização dos ensaios laboratoriais, destinados à obtenção dos parâmetros requeridos na aplicação de MBQ em camadas de infraestruturas de transporte. Dada a evolução técnica e tecnológica de tais equipamentos, os mesmos permitem uma significativa evolução na reprodução dos métodos laboratoriais quando comparados com as condições verificadas em campo.

Perante o descrito, o objetivo deste estudo é o de simular de uma forma tão real quanto possível o comportamento de uma MBQ, através de ensaios físicos relacionados com o seu desempenho estrutural, dando seguimento ao preconizado na NP EN 13108-1 Anexo NA (vd 2.1). No estudo a efetuar em laboratório será utilizado um processo de compactação que pretende simular com alguma precisão as várias fases dos processos de compactação envolvidas nas situações reais de obra, proporcionando estudos de formulação mais objetivos e realistas.

Para tal, foi utilizado um compactador de rolo (designado na língua inglesa por *roller-compact*), regulamentado através da norma Europeia NP EN 12697-33, e destinado à compactação de provetes de MBQ para avaliação do seu comportamento às deformações permanentes e preparação de provetes para determinação do módulo e fadiga através das formulações já conhecidas.

O compactador de rolo, através do seu método de compactação, poderá eventualmente solucionar as desvantagens apontadas ao método de compactação Marshall, pois permite simular em laboratório o fabrico, aplicação e desempenho das misturas betuminosas, independentemente do tipo de mistura utilizada.

Pretende-se neste trabalho contribuir para um melhoramento da formulação de MBQ, através da comparação dos dois métodos de compactação e introduzindo

novos parâmetros de avaliação, como alternativos. Assim, irão ser formulados dois estudos laboratoriais, utilizando dois métodos de formulação diferentes, um empírico utilizando o método Marshall e outro baseado no desempenho das misturas betuminosas, através da utilização do compactador de rolo. Neste último método são introduzidos no estudo os parâmetros do módulo de rigidez, ângulo de fase, resistência à fadiga e deformação permanente. Estes parâmetros são recomendados em função da mistura a avaliar, do tipo de pavimento pretendido, da localização geográfica da sua aplicação e da temperatura de referência relativa à zona da sua aplicação.

Com o compactador de rolo foram reproduzidas com sucesso em laboratório as várias fases de compactação efetuadas em obra, assim como ensaios que permitem a determinação das propriedades intrínsecas das misturas através do seu desempenho.

Compararam-se os resultados de ensaios realizados com os dois métodos de formulação referidas e também com provetes colhidos em obra. As colheitas foram efetuadas num pavimento onde foi aplicada uma MBQ do tipo AC 14 SURF 35/50 produzida e aplicada com os mesmos materiais usados neste estudo e praticamente com a mesma formulação que obtivemos pelo método Marshall.

1.3 MÉTODOS DE FORMULAÇÃO UTILIZADOS NESTE TRABALHO

Para a realização do presente trabalho, foi estudado uma mistura betuminosa do tipo AC14 SURF 35/50, BB (Quadro 3), sobre a qual foram realizados dois estudos de formulação, um recorrendo ao método de formulação empírica seguindo o método Marshall (vd. 2.4.2), e um outro baseado no desempenho das misturas (vd. 2.4.6). Sobre provetes moldados em laboratório, foram realizados ensaios laboratoriais preconizados pelo método Marshall, e os sugeridos para o novo método de formulação, baseada no desempenho da MBQ e utilizando o compactador de rolo.

Todos os trabalhos de laboratório efetuados neste estudo foram realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Dos dois métodos de formulação referenciados, o método que quase universalmente é adotado para formulação das MBQ é o método de formulação empírico designado por método Marshall (vd.2.4.2). Este método utilizou-se no presente trabalho para uma formulação convencional típica com os materiais disponíveis, sendo sido este o método de referência para comparação dos três métodos de compactação, Marshall, compactador de rolo e em obra.

O método Marshall, apesar de ser muito utilizado, apresenta algumas vantagens e inconvenientes (Picado Santos, 2013) que o caracterizam e que designadamente são:

VANTAGENS:

- Método que, pelo seu longo historial de aplicação, induz uma experiência muito significativa na sua aplicação, permitindo uma previsão do comportamento
- Utilização de equipamentos de relativo baixo custo
- Técnicas de ensaio simples e fáceis de executar
- Existem muitos resultados e informação disponíveis que podem servir de base ao estabelecimento de critérios de qualidade para as misturas, para uma ampla gama de utilizações

INCONVENIENTES:

- O método inclui a realização de ensaios empíricos e, por isso, não se baseia nas propriedades fundamentais de desempenho das misturas
- O processo de compactação em obra não é adequadamente representado pelo método Marshall, não simulando o comportamento dos materiais nem dando representatividade aos provetes moldados
- Limitação da dimensão máxima do agregado a utilizar (25mm) na fabricação dos provetes de MBQ
- Ausência de parâmetros de controlo da qualidade em obra relacionadas com o estudo laboratorial efetuado
- Dificuldade no controlo da temperatura no fabrico dos provetes devido à reduzida dimensão do provete
- Fraca representatividade dos provetes moldados
- Como não se baseia nas propriedades de desempenho das misturas betuminosas, torna-se desadequado perante novas exigências e em novos materiais a aplicar em pavimentos rodoviários

Os métodos mais recentemente propostas consideram princípios de formulação que procuram traduzir os mecanismos de ruína a que os pavimentos estão sujeitos. Desta forma, as misturas são formuladas essencialmente com base na verificação de certos requisitos mínimos de desempenho mecânico, por vezes, respeitando simultaneamente determinadas propriedades volumétricas.

Assim, o segundo método de formulação seguida neste trabalho, enquadra-se no grupo das misturas formuladas através do seu desempenho (vd 2.4.6), seguindo-se a análise das características da resistência ao fendilhamento por fadiga, deformação permanente (Pais et al., 2000) e módulo de deformabilidade das MBQ, para diferentes valores da percentagem de betume. Para além dos ensaios que determinam as características de desempenho também foram analisadas as características físicas da baridade imersa e da Baridade Máxima Teórica (BMT) experimental.

Este segundo método de formulação proposta apresenta como vantagens a superação dos inconvenientes reconhecidos universalmente ao estudo de formulação Marshall, recorrendo a tecnologias de modernos equipamentos, informatizados e de muito pouca intervenção do operador e referenciados nas Normas Europeias. Ainda como vantagem refere-se a facilidade com que a programação informática poderá combinar os dados obtidos com os requisitos desejados, uma vez que todos os parâmetros de desempenho são obtidos informaticamente.

Como inconvenientes, reconhece-se a falta de estudos e de experiência para aplicação do método até à execução do presente trabalho, o tempo necessário para a sua execução e também o custo elevado dos equipamentos intervenientes. No entanto, este dito inconveniente, remete para a realização de tais estudos de formulação para laboratórios de referência e acreditados que darão as garantias necessárias à boa execução de tais estudos.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho desenvolve-se, para além deste primeiro capítulo, em mais cinco, que organizam a informação recolhida e as diferentes fases desenvolvidas e consideradas importantes e necessárias para conclusão deste trabalho. Neste capítulo 1 apresenta-se o enquadramento do trabalho, a classificação e descrição dos diversos tipos de formulação, os objetivos da dissertação e os estudos de formulação realizados neste trabalho.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sumária, abordando os temas da constituição de uma mistura betuminosa, os principais métodos de formulação de MBQ, referindo-se alguns métodos de compactação de misturas betuminosas em laboratório.

No Capítulo 3 apresentam-se os dois estudos de formulação de misturas betuminosas a quente desenvolvidos. Uma completa e detalhada descrição do método Marshall, baseada no Anexo Nacional da NP EN 13108-1 e com os ensaios de

caracterização dos materiais seguindo as diretrizes no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2012). Neste estudo inclui-se um método de composição dos provetes designada de “farmacêutica”, a qual permite uma dosagem que garante a igualdade das composições de todos os provetes.

O segundo estudo apresentado, de carácter inovador, onde serão analisadas algumas características de desempenho da mistura betuminosa, sugerindo através delas hipóteses de serem consideradas num novo tipo de formulação.

No capítulo 4 faz-se a análise dos resultados obtidos, para as três formas de obtenção de provetes: método Marshall, compactador de rolo e recolhidos em obra.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões dos estudos efetuados, recomendações relativas a aplicação do método de formulação proposta, bem como algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

2 FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Na Introdução da NP EN 13108-1 presentemente em vigor, esta prevê dois tipos de abordagem para definir o betão betuminoso: a abordagem empírica e a abordagem fundamental. De acordo com o estipulado naquela Norma Europeia o objetivo final é o de especificar o betão betuminoso em termos de “*propriedades fundamentais baseadas no desempenho*”. No entanto, dadas as diferenças de conhecimento e de experiência no espaço comunitário europeu é incluída a abordagem empírica. Assim, os países com menos experiência na abordagem fundamental podem optar, numa primeira fase, pela abordagem empírica e irem adquirindo experiência nos ensaios baseados no desempenho, de forma a enveredar pelo uso cada vez mais generalizado da abordagem fundamental para especificar o betão betuminoso.

Dado o atual estado da arte em Portugal, o presente Anexo Nacional da NP EN 13108-1 recomenda a especificação do betão betuminoso com base na abordagem empírica, prevendo-se, no entanto, que Portugal adquira brevemente experiência na abordagem fundamental.

2.2 MISTURAS BETUMINOSAS A QUENTE

As misturas betuminosas a quente (MBQ) são normalmente utilizadas na execução de pavimentos flexíveis, sendo a utilização mais comum a da construção de pavimentos rodoviários e aeroportuários. As misturas betuminosas a quente tradicionais são uma mistura de um ligante e de uma mistura de agregados, fabricada de modo a que todas as partículas de agregado sejam revestidas por uma película de ligante. O seu processo de fabrico implica o aquecimento do ligante e dos agregados, a sua mistura e a sua aplicação em obra, que é realizada a temperaturas significativamente superiores à temperatura ambiente.

Designam-se por MBQ (Figura 1) todas as misturas produzidas em central e em que, pelo menos um dos componentes é previamente aquecido para que o envolvimento dos agregados pelo betume possa ser efetivo (Picado Santos, 2012).

As misturas betuminosas (Figura 1) são constituídas por agregados (80 a 85%), betume (8 a 13%) e ar, cujas propriedades dependem das proporções relativas

destes componentes, assim como das características intrínsecas do betume e dos agregados (Neves, 2001).

Duma forma geral, todos os constituintes duma MBQ são aquecidos em separado e posteriormente misturados num rápido processo de envolvimento de betume e agregados.

A aplicação de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários ou aeroportuários, deverá ser precedida por ensaios que permitam determinar a percentagem de ligante a ser utilizado na mistura, para que a mesma se enquadre dentro das especificações que são definidas, com a finalidade de evitar desagregação prematura da mistura por falta de ligante ou superfícies escorregadias e deformáveis, por excesso de ligante.

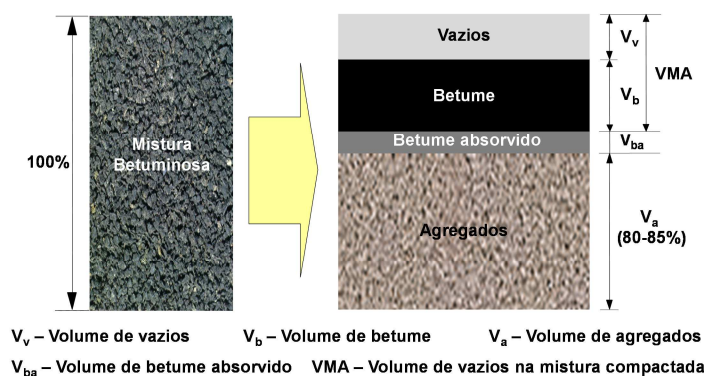


Figura 1 – Constituição tipo de uma mistura betuminosa

A formulação de misturas betuminosas resulta assim da natural necessidade de se tentar controlar e otimizar as proporções ponderais dos materiais constituintes de uma mistura betuminosa, garantindo que a mesma apresentava no final do estudo o comportamento adequado para a aplicação pretendida.

2.2.1 Constituintes de uma mistura betuminosa

Os componentes sólidos de uma mistura betuminosa do tipo Betão Betuminoso são os agregados e o betume (Figura 1).

AGREGADOS

De acordo com as definições constantes das normas europeias, agregado é o material granular utilizado na construção e pode ser natural, artificial ou reciclado. Um agregado natural é um agregado de origem mineral que foi sujeito apenas a processamento mecânico. O agregado artificial é um agregado de origem mineral resultante de um processamento industrial compreendendo modificações térmicas ou

outras. Um agregado reciclado é um agregado resultante do processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizados na construção.

Os agregados correspondem a cerca de 80% do volume global das misturas betuminosas. Estes formam um esqueleto pétreo, que deve ter a capacidade de resistir à ação do tráfego.

Em função do modo como são obtidos e processados os agregados, estes podem classificar-se como naturais ou britados. Os naturais são materiais sedimentares obtidos de extração direta, os britados são obtidos por fratura mecânica de rochas (Branco, F. *et al*, 2008).

Os agregados a aplicar nos diversos tipos de misturas, devem apresentar-se homogêneos e não devem conter matéria orgânica ou quaisquer substâncias estranhas, tais como madeira, vidro e plástico que afetem as misturas. Devem ser pouco suscetíveis à meteorização e apresentarem-se sãos ou pouco alterados (de acordo com os critérios propostos pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas - ISRM) (EP, 2012).

De acordo com as especificações de produto constantes na norma europeia EN 13043, os agregados aplicados em misturas betuminosas devem ser provenientes da britagem de rochas duras, não alteráveis, ter uma boa forma e serem resistentes à rotura e à degradação induzida pelo efeito de abrasão e de fragmentação do tráfego.

Para determinar as características que são exigidas devem ser analisados aspetos relativamente à granulometria, à resistência mecânica, à forma das partículas, à limpeza e adesividade ao ligante, entre outras propriedades (Branco, F. *et al*, 2008; Freire, A. C., 2004).

A análise granulométrica dos agregados é o processo que visa definir, para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanho, a percentagem em peso que cada fração possui em relação à massa total da amostra em análise. A dimensão das aberturas e o número de peneiros são selecionados de acordo com a natureza da amostra e a precisão exigida.

As amostras a serem ensaiadas, deverão ser submetidas a um sucessivo processo de divisão, por forma a se obterem provetes representativos. Neste processo de representatividade, o operador está impedido de fazer pequenos ajustes manuais, devendo para isso utilizar um esquartelador ou outro divisor mecânico onde a amostra laboratorial será levada a um escoamento livre.

Na prática, a análise granulométrica é realizada agitando o agregado através de uma série de peneiros, ordenados da malha mais larga para a malha mais

apertada. A agitação da peneiração poderá ser efetuado manual ou mecanicamente, tendo sido utilizada este estudo a peneiração mecânica. As curvas granulométricas são fundamentais para apreciar rapidamente às dimensões de um agregado e consequentemente a granulometria do agregado e as deficiências que possa ter a nível de certas frações granulométricas, como por exemplo a falta de partículas de uma dada dimensão.

BETUME

O ligante é um elemento essencial de uma mistura betuminosa, dado que é ele que liga os agregados e fornece coesão e estabilidade à mistura.

Existem diversos tipos de ligantes que podem ser utilizados na composição das misturas betuminosas. Contudo geralmente são utilizados os betumes asfálticos provenientes da refinação do crude.

O ligante betuminoso é um material praticamente não volátil, facilmente inflamável, apresenta alta viscosidade, é adesivo, impermeável à água, quase sólido à temperatura ambiente e é quase completamente todo solúvel em tolueno. O seu aparecimento pode ocorrer na natureza ou ser obtido artificialmente, em processo de destilação do petróleo (EP, 2012).

A representação gráfica da evolução da viscosidade com a temperatura pode ser observada em diagramas do tipo do desenvolvido por Heukelom, W. (Azevedo, 1993), denominado BTDC - *Bitumen Test Data Chart* (Figura 2). Trata-se de um sistema de representação no qual as escalas, linear para a temperatura e logarítmica para a viscosidade, foram selecionadas para que a representação dos betumes clássicos rodoviários corresponda a uma linha reta.

Os valores da temperatura ideais para o fabrico e compactação das misturas betuminosas, também podem ser estimados a partir da representação gráfica da evolução da consistência dos betumes com a temperatura no diagrama BTDC apresentado mostra bem que os betumes com grande suscetibilidade à temperatura (Azevedo, 1993).

A inclinação da reta (Figura 2) indica a sua suscetibilidade à temperatura e está relacionada com o seu índice de Penetração, IP. Este índice é o parâmetro que foi adotado para, de um modo simplificado, representar a suscetibilidade dos betumes à temperatura (Azevedo, 1993).

Um betume deverá estar suficientemente fluido para envolver o agregado, num tempo considerado mínimo para obtenção de uma mistura homogénea; suficientemente viscoso para que não ocorram fenómenos de drenagem durante a

mistura, armazenamento e transporte; suficientemente fluído para que a mistura permaneça trabalhável durante a compactação; suficientemente viscoso para suportar a circulação do equipamento de compactação.

Em pavimentação, estes ligantes aplicam-se principalmente para dar coesão e flexibilidade à mistura, utilizando o seu poder aglutinante para unir as partículas dos agregados, podendo assim resistir aos esforços produzidos pelo tráfego, sem sofrer desagregação nem deformações permanentes.

Os agregados e o betume são então combinados segundo critérios estabelecidos e em partes percentuais perfeitamente definidas, misturados a quente e dando lugar a uma mistura betuminosa que poderá ser ou não convencional (Figura 1).

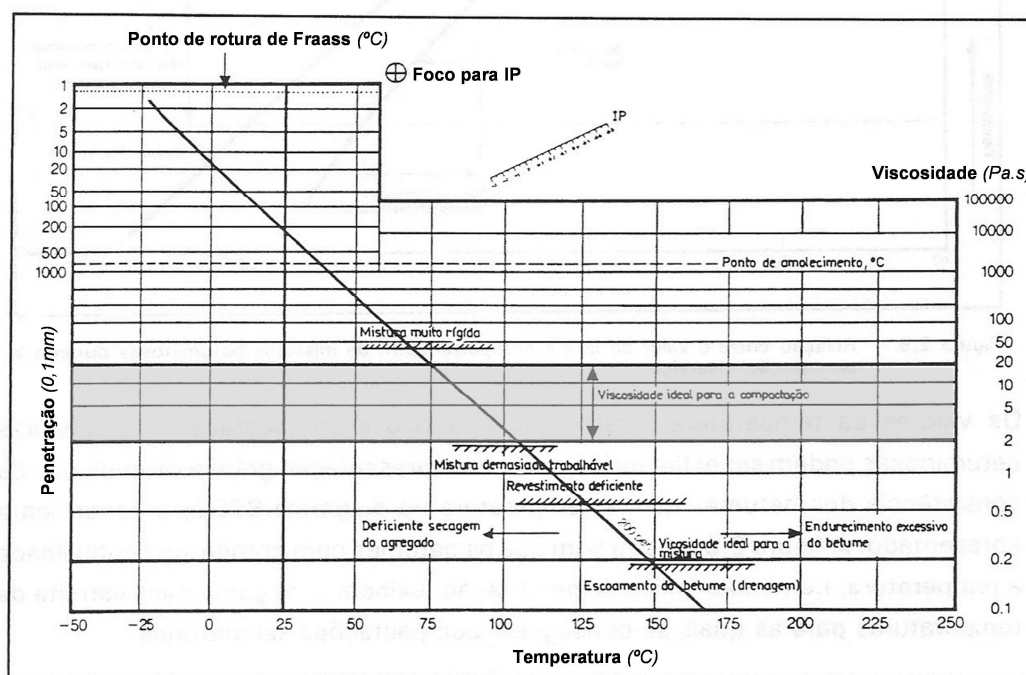


Figura 2 – Diagrama BTDC, adaptada de (Azevedo, 1993)

As misturas betuminosas não convencionais poderão ter na sua constituição elementos como fibras, borracha, polímeros, ou outros constituintes.

A aplicação das MBQ só deverá ser iniciada após a verificação da conformidade da camada subjacente de acordo com os critérios de aceitação especificados.

Segundo as exigências do Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal (EP, 2012), o betume de penetração nominal 35/50 deverá ser aplicável a

todas as misturas betuminosas, preferencialmente quando se pretende que estas sejam aplicadas na rede principal. A mesma especificação indica como requisitos desse ligante o índice de penetração a 25°C de 35 a 50 (unidades) e a temperatura de amolecimento entre 50 e 58°C.

2.3 TIPOS DE MISTURAS BETUMINOSAS A QUENTE

Em Portugal, o termo mistura betuminosa a quente aplica-se a grande parte das misturas betuminosas utilizadas em obras de pavimentação, desde as argamassas betuminosas, fabricadas apenas com agregados finos, filer e betume, até aos macadames betuminosos, nos quais os agregados grossos têm um papel preponderante no comportamento da mistura (Cepsa, 2007).

O Anexo Nacional da NP EN 13108-1 define as misturas betuminosas (Quadro 1), tendo em vista facilitar a identificação das misturas betuminosas habitualmente utilizadas em Portugal.

Quadro 1 – Designação das misturas betuminosas (NP EN 13108-1 Anexo A)

Designação das Misturas Betuminosas		
CAMADA	DESIGNAÇÃO ANTERIOR	DESIGNAÇÃO ATUAL
BASE	Macadame Betuminoso Fuso B	AC 32 base ligante (MB)
	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 base ligante (MB)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 20 base ligante (MBAM)
LIGAÇÃO	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 bin ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 bin ligante (MBD)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 16 bin ligante (MBAM)
	Betão Betuminoso Subjacente	AC 14 bin ligante (BBsb)
	Argamassa Betuminosa	AC 4 bin ligante (AB)
REGULARIZAÇÃO	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 reg ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 reg ligante (MBD)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 16 reg ligante (MBAM)
	Betão Betuminoso Subjacente	AC 14 reg ligante (BBsb)
	Betão Betuminoso	AC 14 reg ligante (BB)
	Argamassa Betuminosa	AC 4 reg ligante (AB)
DESGASTE	Argamassa Betuminosa	AC 4 surf ligante (AB)
	Betão Betuminoso	AC 14 surf ligante (BB)
	Betão Betuminoso Rugoso	AC 14 surf ligante (BBr)
	(micro) Betão Betuminoso Rugoso	AC 10 surf ligante (BBr)

Nota explicativa de abreviaturas:
AC – designação do produto, cujo termo em inglês é “Asphalt Concrete”
base – referente à camada de base, cujo termo em inglês é “base course”
bin – referente à camada de ligação, cujo termo em inglês é “binder course”
reg – referente à camada de regularização, cujo termo em inglês é “regulating course”
surf – referente à camada de desgaste, cujo termo em inglês é “surface course”.

O atual normativo Europeu inclui um conjunto de Normas Europeias que definem requisitos para as misturas betuminosas fabricadas a quente - 8 partes da







série 13108, cujas propriedades são caracterizadas pelos respetivos métodos de ensaio descritos na série EN 12697 (43 partes) (EP, 2012).

O grupo do betão betuminoso inclui a generalidade das misturas betuminosas habitualmente aplicadas em Portugal, onde consta a nova e a anterior designação adotada em Portugal.

De acordo com recomendações do Organismo de Normalização Nacional – Instituto Português da Qualidade (IPQ), devem ser mantidas as abreviaturas constantes da versão inglesa da EN 13108-1, para assim facilitar o entendimento comum entre os vários Estados-Membros, recomenda-se que sejam adicionadas siglas correspondentes ao tipo de mistura em causa.

2.4 PRINCIPAIS MÉTODOS DE FORMULAÇÃO

No que se refere à classificação dos métodos de formulação, foi considerada como referência no presente estudo a classificação adotada no relatório da RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages*) sobre o estado da arte de diversos métodos de formulação utilizados a nível mundial (Francken, 1998). Segundo o mesmo relatório, os métodos de formulação de MBQ, designadamente os aplicáveis a misturas do tipo Betão Betuminoso (BB), podem ser classificados nas seis categorias a seguir apresentadas, sendo que nos itens seguintes estas são descritas de um modo mais detalhado.

-  Receita
-  Empíricos
-  Analíticos
-  Volumétricos
-  Relacionados com o desempenho
-  Baseados no desempenho.

2.4.1 Método tipo receita

Este método designado por *receita*, estabelece a constituição duma MBQ, quando esta é tradicional e se tem muita experiência da sua utilização.

De acordo com o método tipo receita deverá ser definida a curva granulométrica dos agregados, o valor da penetração do betume a usar na

composição da mistura, a espessura da camada a colocar e as características a apresentar pela mistura durante o fabrico, espalhamento e compactação.

Este método, embora classificado como um método de formulação, não é baseado na realização de ensaios laboratoriais que permitam aferir, por exemplo, qual a composição a utilizar no fabrico de uma mistura betuminosa, ou as suas propriedades intrínsecas.

A experiência adquirida é o resultado da análise do comportamento das misturas betuminosas, durante o fabrico, aplicação e desempenho em obra para longos períodos de tempo. Têm-se em consideração os diferentes tipos de materiais utilizados, a composição volumétrica ou em massa adotada, o modo de fabrico, transporte e compactação utilizado, assim como o tipo de camada e a sua espessura, em função das condições de tráfego e climáticas existentes.

2.4.2 Métodos de formulação empíricos

Os métodos empíricos surgem como complemento natural dos métodos por receita, recorrendo a ensaios laboratoriais de moldagem e testes físicos de provetes, possibilitando determinar a percentagem ótima de betume a utilizar numa determinada MBQ, controlando algumas das suas variáveis.

Os provetes moldados em laboratório permitem a determinação de diversas grandezas, referindo-se a porosidade, a avaliação da estabilidade e deformação através de ensaios laboratoriais. Estes métodos permitem, através de critérios volumétricos baseados na experiência adquirida, seleccionar uma percentagem ótima de betume a utilizar no fabrico de uma MBQ.

Apesar da componente experimental, os métodos de formulação empíricos baseiam-se apenas na experiência, ou seja, têm por base a utilização em laboratório de métodos de compactação de provetes que não reproduzem a compactação em obra. Também, os ensaios empíricos não permitem determinar as propriedades intrínsecas das MBQ, mas apenas grandezas mecânicas, as quais não se relacionam de forma direta com o desempenho em obra. Como exemplo, não é possível determinar a resistência à fadiga através da estabilidade obtida num ensaio empírico.

Uma nova fase de desenvolvimento dos métodos empíricos decorreu com o desenvolvimento de métodos de formulação como sejam os métodos de Hubbard-Field, de Hveem ou de Marshall, sendo este último um dos métodos de formulação mais conhecido e utilizado atualmente a nível mundial e em Portugal.

O método de Marshall deve o nome a Bruce Marshall do *Mississippi State Highway Department*, responsável pela invenção do ensaio Marshall na década de 30 do século XX.

Este método baseia-se em grande parte na utilização dos resultados do ensaio de Marshall o qual foi posteriormente aperfeiçoado e adotado pela *U.S. Army Corps of Engineers* para formulação e controlo do fabrico em obra, em 1943, tendo sido posteriormente acrescentados critérios para dosagem. Este estudo de formulação passou a designar-se por método Marshall, a qual atualmente se mantém e que se encontra descrita no Anexo Nacional da norma na NP EN 13108-1:2011 Formulação de Misturas Betuminosas.

2.4.3 Métodos de formulação analíticos

De acordo com o método tipo receita deverá ser definida a curva granulométrica dos agregados, o valor da penetração do betume a usar na composição da mistura, a espessura da camada a colocar e as características a apresentar pela mistura durante o fabrico, espalhamento e compactação.

Em geral, estes métodos dispõem ainda de modelos de previsão das características mecânicas fundamentais das misturas, as quais são determinadas com base nas composições volumétricas obtidas por aplicação do procedimento analítico. Também, a determinação da composição base é exclusivamente por via analítica. Os métodos analíticos não têm por objetivo a obtenção de uma percentagem ótima de betume, antes visam determinar uma composição que assegure a melhor relação entre a resistência à resistência ao fendilhamento por fadiga e a resistência à deformação permanente, o que não corresponde necessariamente à formulação de uma mistura betuminosa com um desempenho adequado em obra.

2.4.4 Métodos de formulação volumétricos

A designação “métodos volumétricos” resulta do fato das dosagens dos materiais que compõem a mistura serem obtidos através da análise dos volumes parcelares que compõem a mistura (agregados, betume e vazios).

Estes volumes são medidos sobre provetes produzidos em laboratório de modo a reproduzirem, tão fielmente quanto possível, as condições de compactação aplicadas em obra.

A formulação através de métodos volumétricos, não requer genericamente a realização de ensaios para aferir as propriedades mecânicas, uma vez que se

considera que o ensaio de compactação utilizado em laboratório permite obter misturas com propriedades volumétricas semelhantes às obtidas em obra.

Tal como os métodos analíticos, os métodos volumétricos são, só por si, insuficientes, havendo necessidade de realizar ensaios adicionais para verificar as composições resultantes dos cálculos efetuados. Dado o grande número de variáveis envolvidas, não é de todo possível obter, com elevada confiança, misturas com bom comportamento mecânico recorrendo apenas aos métodos volumétricos.

2.4.5 Métodos de formulação relacionados com o desempenho

Os métodos de formulação relacionados com o desempenho visam selecionar uma mistura betuminosa, considerando o seu desempenho e tendo como ponto de partida a utilização de uma composição volumétrica ou ponderal dos seus constituintes, previamente determinada para uma dada MBQ, segundo determinados critérios volumétricos e através da aplicação de um dos métodos de formulação anteriormente descritos.

Estes métodos consistem no fabrico de provetes de MBQ que cumprem certos critérios estabelecidos de composição volumétrica, sendo posteriormente sujeitos a ensaios mecânicos de modo a avaliar as propriedades das misturas, relacionadas com o comportamento mecânico do pavimento. As composições finais das misturas são finalmente ajustadas com base nos resultados dos ensaios mecânicos realizados. Estes ensaios procuram reproduzir em laboratório, tanto quanto possível, as condições a que a mistura betuminosa será sujeita quando aplicada, nomeadamente o nível de tensão e a temperatura, quer durante os trabalhos de fabrico e aplicação das misturas (eg. ensaio na Prensa Giratória de Corte - PGC) quer após a entrada em serviço, ao longo da vida do pavimento (eg. ensaio com simulador de tráfego).

2.4.6 Métodos de formulação baseados no desempenho

Estes métodos são os que envolvem uma maior complexidade, tratando-se de métodos pouco divulgadas e generalizadas. Consistem em ensaiar provetes moldados e a percentagem de betume é fixada com base em previsões a que se chega por aplicação daqueles modelos.

Estes métodos consistem em sujeitar a ensaios que em princípio traduzem bem o comportamento em serviço das misturas betuminosas (por vezes designados por ensaios racionais), misturas cujas composições foram obtidas por quaisquer dos

métodos acima mencionados (normalmente métodos volumétricos), prevendo-se o seu comportamento ao longo dum certo período através da introdução dos resultados num sistema de avaliação integrado. Os ensaios racionais permitem medir as propriedades fundamentais das misturas, as quais podem ser usadas como dados de entrada em modelos de previsão do comportamento dos pavimentos. A percentagem ótima de betume é fixada com base nas previsões a que se chega por aplicação daqueles modelos.

A previsão do desempenho é realizada através de modelos que têm em consideração as ações climáticas, propriedades dos materiais, de degradação dos materiais e sua evolução, função do tipo de estrutura e ações que irão solicitar o pavimento, permitindo estimar a evolução da degradação no pavimento.

Porém, a complexidade da análise do comportamento global de um pavimento ou considerando individualmente as suas camadas constituintes, quando solicitadas pelas ações tornam este método difícil de ser implementado, quer pelos modelos quer pelo ensaios laboratoriais necessários.

2.5 MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO

Existem vários métodos de compactação laboratorial de misturas betuminosas, utilizados para a determinação duma baridade de referência, quando da formulação de uma dada mistura betuminosa. É importante ter em consideração a forma como os métodos de compactação laboratorial influenciam as propriedades duma mistura betuminosa, pois tal método é utilizado para a simulação em laboratório das características obtidas em obra. Como tal apresentam-se de seguida alguns métodos de compactação mais utilizados em laboratório.

2.5.1 Compactador de impacto

O compactador por impacto (Figura 3), normalmente designado por compactador Marshall, foi desenvolvido por Bruce Marshall do *Mississippi State Highway Departament*, responsável pela invenção do ensaio Marshall na década de 30 do século XX. Devido à simplicidade e vasta experiência deste método, é ainda hoje o método de compactação laboratorial mais utilizado em todo o mundo.

A compactação é efetuada mecanicamente através da queda duma massa deslizante de $4550 \pm 20\text{g}$, a partir de uma determinada altura de queda de $460 \pm 3\text{mm}$, com a aplicação de um determinado número de pancadas, num determinado intervalo de tempo, sobre a base do pilão, que se encontra posicionada sobre o provete

betuminoso. Os moldes para compactação dos provetes deverão apresentar um diâmetro interno de $101,6 \pm 0,1$ mm, sendo constituídos por uma alonga, um cilindro de molde e uma base de molde. A base do molde deverá ser feita de um material em aço e ser suficientemente rígida para evitar deformações durante a sua utilização e as suas superfícies deverão ser endurecidas. Destinam-se à compactação de misturas betuminosas fabricadas em laboratório, recolhidas no local da obra ou na central de fabrico. O provete é em seguida arrefecido à temperatura ambiente (NP EN 12697-34).



Figura 3 – Compactador de impacto e moldes Marshall

Este método de compactação não simula a compactação em obra, sendo este fato uma limitação do método, reconhecida na comunidade científica, reunindo o seu consenso e apontado regularmente.

2.5.2 Método Duriez

O método de compactação Duriez estabelece, tal como os métodos anteriores, o modo de fabricar os provetes e de os ensaiar, por forma a otimizar o teor em ligante betuminoso, para uma dada granulometria de agregados e para certo tipo de ligante.

Os provetes são preparados (Figura 4) por compressão uniaxial de duplo efeito, aplicada nas duas extremidades, (força de 180kN aplicada durante 5 minutos) com o teor em ligante estimado analiticamente ou por leitura em tabela.

Os provetes são moldados com dimensões diferentes, conforme se tratem de misturas para camadas de desgaste (diâmetro de cerca de 80 mm por 195 mm de

altura) ou para camadas de regularização ou de base (120 mm de diâmetro por 275 mm de altura).

A seguir à determinação da baridade da mistura compactada e cálculo das respetivas porosidades, são executados os ensaios de compressão simples para determinação da estabilidade (resistência à compressão simples), a uma velocidade de aproximação dos pratos da máquina de 1mm/s, a diferentes temperaturas (18°C e 50°C).



Figura 4 – Prensa multiusos e conjunto de moldagem Duriez

Algumas séries de provetes são imersas em água, para avaliação do efeito da água na adesividade ligante/agregado (índice de manutenção de resistência após imersão), tal como indicado no *Projet de Mode Opératoire - Essai de compression simple sur enrobés hydrocarbonés. Essai Duriez L.C.P.C.* A partir dos valores das grandezas referidas é selecionado o teor "ótimo" em betume das misturas betuminosas que verifique o critério estabelecido no *Mémento des Spécifications Françaises. Chaussées* (SETRA/LCPC, 1984, referido em Azevedo 1993)

2.5.3 Compactador giratório

O compactador giratório (Figura 5), apesar da sua longa história, apenas conseguiu alguma notoriedade nos últimos 15 anos (Micaelo, 2008). O primeiro modelo, manual, designado de Compactador Giratório do Texas, foi criado por elementos do Departamento de Estradas do Texas e normalizado em 1946. Nos anos

60 e 70, o LCPC criou um modelo automático a partir do compactador giratório do Texas, designado de Prensa de Corte Giratório (Micaelo, 2008).

Enquanto no primeiro modelo o ângulo do molde e a velocidade eram elevados, respetivamente 6 e 60rpm, provocando uma compactação rápida em 15 a 18 rotações, no segundo modelo estes parâmetros foram reduzidos para 1,25 e 6rpm e carga fixa em 600kPa. No início dos anos 90, nos EUA, no âmbito do programa SHRP, o compactador foi otimizado para o método de formulação SUPERPAVE, especificando o ângulo do molde, a velocidade de rotação e a carga estática, respetivamente, em 1,25, 30rpm e 600kPa. O número de rotações a que o provete é sujeito depende do objetivo e da classe de tráfego da estrada. O modelo mais recente, normalizado na Europa, com base na experiência de que equipamentos de diferentes fabricantes geram compactações diferentes apesar de especificarem os parâmetros com igual valor, a norma EN 12697-31 define um procedimento de calibração em que são determinados a força e o ângulo do molde que permite obter a mesma porosidade, para um número fixo de rotações, que o modelo padrão definido (Micaelo, 2008).



Figura 5 – Compactador giratório

A norma Europeia EN 12697-31 especifica o método para a compactação de provetes cilíndricos de misturas betuminosas utilizando um compactador giratório.

Essa compactação é alcançada pela combinação de uma ação de corte rotativo e vertical força resultante aplicada por uma cabeça mecânica.

O método é utilizado para:

- Determinação do teor de vazios de ar de uma mistura betuminosa, para um determinado número de revoluções ou índice de vazios.
- Preparação de amostras de determinada altura e / ou a uma densidade pré-determinada, por teste subsequente das suas propriedades mecânicas.

A mistura betuminosa é contida dentro de um molde cilíndrico limitada por pastilhas é mantida a uma temperatura constante dentro de tolerâncias ao longo de todo o período de duração do teste.

A compactação é alcançada pela ação simultânea de uma compressão estática de baixo, e da ação de corte resultante do movimento do eixo do molde, gera uma superfície cônica de revolução (Figura 6), enquanto as extremidades do provete de teste deve permanecer idealmente perpendicular ao eixo.

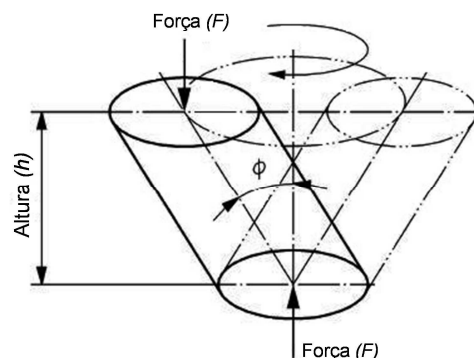


Figura 6 – Diagrama do movimento de compactação do provete (EN 12697-31)

O compactador giratório é o equipamento de compactação laboratorial utilizado no método de formulação SUPERPAVE.

2.5.4 Compactador Kneading

O processo *kneading* foi desenvolvido nos EUA, primeiro para a produção de provetes cilíndricos (compactador californiano) e mais tarde para provetes prismáticos (compactador linear) (Figura 7). O termo *kneading* está relacionado com a imposição de elevadas deformações por corte à mistura da mesma forma que os cilindros de pneus impõem.

De acordo com Sousa et al., citado em Azevedo (1993), o *kneading* transmite um elevado e localizado esforço de corte, sendo consideráveis os movimentos do

material nos primeiros estágios de compactação; a mistura fica densa, e os provetes apresentam um ótimo contacto entre partículas, uma orientação uniforme da fração grossa dos agregados e uma estrutura homogénea.

O procedimento, automático, consiste na aplicação de forças por um pé compactador, atuado por um êmbolo, com dimensões inferiores à do molde de forma sequencial para cobrir uniformemente toda a superfície do provete. Para provetes circulares, o pé com a forma de um sector circular movimenta-se no sentido ascendente e descendente enquanto o molde roda no sentido contrário aos ponteiros do relógio nos períodos de descanso, nos quais o pé não está em contacto com a superfície. Quando o pé exerce a pressão a mistura betuminosa levanta junto aos bordos.



Figura 7 – Compactador *Kneading*

Nos equipamentos para compactação de provetes prismáticos o procedimento é semelhante com o pé de base retangular a efetuar deslocamentos no sentido vertical e horizontal para poder cobrir toda a superfície.

Este procedimento não foi incluído nas normas europeias sobre misturas betuminosas. Inclui-se nesta secção pelas inúmeras citações na comparação dos métodos de compactação laboratorial de misturas betuminosas. (Micaelo 2008)

2.5.5 Compactador de rolo

O compactador de rolo foi conceptualmente desenvolvido na Alemanha, como resposta a uma pesquisa dum projeto financiado pelo Ministério dos Transportes no Instituto para a Construção Rodoviária na Universidade Técnica de Braunschweig no início de 1990 (Swiertz et al., 2010). O objetivo do projeto era suportado por uma ideia já concebida no final de 1970 na universidade, baseada pela noção de que as características mecânicas de uma mistura betuminosa podem ser fortemente influenciadas pelo tipo de compactação aplicada em laboratório. O resultado do projeto de pesquisa visava o desenvolvimento de um compactador de laboratório, capaz de reproduzir em laboratório características de compactação semelhantes, às proporcionadas pelos equipamentos de compactação em obra. O equipamento a ser estudado deveria simular a pré compactação da mesa vibradora e a compactação dos cilindros de rasto liso e de pneus.

No estudo desenvolvido nesta dissertação foi utilizado um compactador de rolo utilizando um sector dum cilindro de aço para conferir uma ação de compactar através de uma força descendente (Figura 8), deslocando-se sobre um trólei com movimento de vaivém.

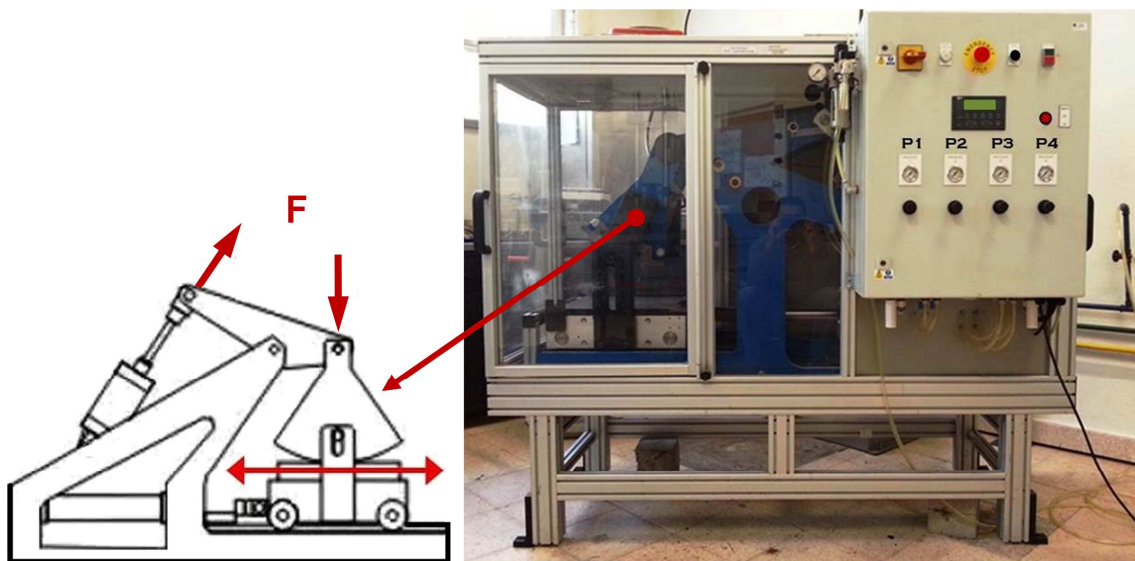


Figura 8 – Compactador de rolo e esquema de aplicação de forças

O compactador é acionado por um meio pneumático do tipo braço-alavanca que proporciona a compactação de lajes de misturas betuminosas, preparadas em laboratório ou não, sob condições que simulam a compactação de campo.

Este aplica quatro níveis diferentes de força vertical, P1, P2, P3 e P4 na base do sector do cilindro (Figura 8), que podem ser programados até aproximadamente

30kN. O compactador produz lajes com as dimensões de 305×305mm ou de 305×405mm com espessuras até 100mm. A espessura exata das lajes pode ser pré-definida o que implica que a compactação a realizar deverá ter uma baridade alvo (Cooper, 2011).

As lajes fabricadas no compactador de rolo podem ser usadas para ensaios de deformação permanente, permitem fabricar vigotas para ensaios de determinação do módulo de rigidez e da resistência ao fendilhamento por fadiga ou serem caroteadas para a obtenção de amostras cilíndricas para o ensaio de determinação do módulo de rigidez por tração indireta, para avaliação da sensibilidade à água ou de resistência conservada, entre outros.

Para cada uma das 4 pressões diferentes definidas, o compactador de rolo efetua um número de passagens que são programadas pelo utilizador no painel digital (Figura 9). As pressões são definidas pelos 4 controladores instalados por baixo dos 4 manómetros analógicos medidores de pressão (Figura 9).

O primeiro nível de pressão vertical, P1 tem apenas uma gama de pressões de 0 a 2,5 bar para garantir que não ocorra um efeito de arco, quando o trólei desce sobre a mistura a compactar. Os níveis P2, P3 e P4 têm uma gama de pressões de 0 a 10 bar.

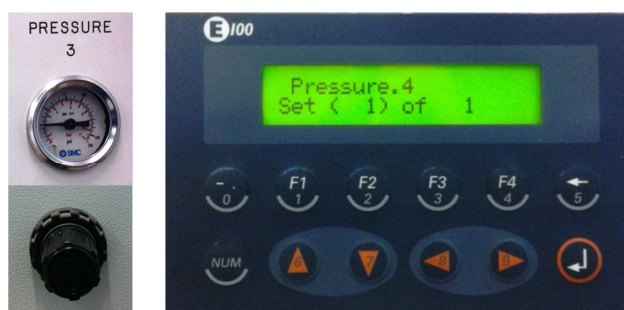


Figura 9 – Controlador de pressão e controlador de número de passagens por pressão

O nível P1 compreende a aplicação de um número mínimo de 2 passagens e para os níveis P2, P3 e P4 podem ser definidas entre 0, e 100 passagens. Ajustando o número de passagens para 0 implica que o compactador de rolo salte para o ajuste de pressão seguinte, sendo que é considerada como passagem o movimento de ida e volta do trólei.

As forças de compactação aplicadas em obra podem ser proporcionalmente transferidas para o sistema do compactador de rolo que, deste modo irá reproduzir a

realidade das forças, através dos seus vários estados de compactação típica que cada um dos seus níveis representa:

- P1 o estado de pré-compactação efetivado pela mesa de compactação da espalhadora
- P2 a passagem do cilindro de rolos metálicos de rasto liso a vibrar ou não
- P3 a passagem dos cilindros de pneus
- P4 o acabamento final efetuado pelo cilindro utilizado em P2, sem vibração, retirando os vincos deixados pelo cilindro de pneus
- O Quadro 2 mostra a relação das pressões e forças possíveis de aplicar no compactador de rolo utilizado.

Quadro 2 – Correlação pressões/forças para o compactador de rolo utilizado

Compactador de rolo Cooper CRT-RCV							
Pressão (<i>bar</i>)	1	2	3	4	5	6	7
Força de compactação (<i>N</i>)	6154	12309	18463	24618	30772	36926	43081

A compactação pode ser interrompida a qualquer momento, mas o trólei irá continuar até ao fim de cada movimento. Se a porta de segurança existente no compartimento que envolve o compactador de rolo se abrir, ou o botão de emergência for acionado, a compactação será imediatamente interrompida.

Em qualquer dos estados de compactação, a vibração manual poderá acionada durante o tempo que se considerar necessário e a ligação é feita no painel de controlo do equipamento através do interruptor ON/OFF (Cooper, 2011).

2.5.6 Compactador vibratório

O compactador vibratório (Figura 10) é constituído por um martelo vibrador fixo numa base deslizante por guias e aplica uma força de compactação atuando por gravidade num determinado intervalo de tempo.

Utilizando um martelo vibrador, de características definidas (potência: 750W; frequência: 30 a 60Hz), munido dum pé com uma extremidade em forma de placa circular, sujeita-se o material a um certo tempo de compactação, em ambos os topos do provete. Podem usar-se pés cuja extremidade tenha um diâmetro inferior à base do

provete, devendo nesse caso distribuir-se uniformemente o tempo de compactação no topo da amostra.

Utiliza um equipamento simples que pode ser usado para outros fins. Produz deformações por corte no material, semelhantes aos cilindros usados em obra, quando se utiliza um pé de diâmetro inferior ao da base do provete.

Contudo considera-se que só reproduz as características dos materiais compactados em obra para certas condições de utilização.

Os provetes têm um diâmetro de 150mm e a altura é variável. (Capitão, 2003).

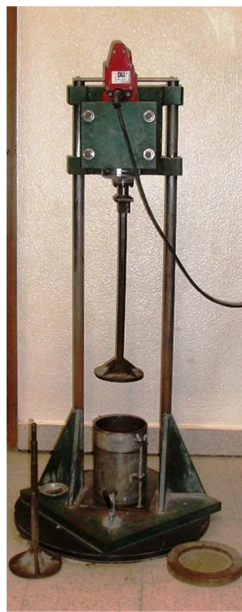


Figura 10 – Compactador vibratório

3 ESTUDO EXPERIMENTAL - COMPACTAÇÃO

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Conforme referido na NP EN 13108-1, são previstos dois tipos de abordagem para definir o betão betuminoso: a abordagem empírica e a abordagem fundamental. De acordo com o estipulado naquela Norma Europeia o objetivo final é o de especificar o betão betuminoso em termos de propriedades fundamentais baseadas no desempenho.

Para que se conseguir chegar a tal objetivo, é necessário reproduzir em laboratório os mesmos estados de compactação aplicados em obra às misturas betuminosas. O equipamento cujo funcionamento e capacidade se aproxima de tais performances é o compactador de rolo utilizado neste estudo, ilustrado na Figura 8.

No presente capítulo apresenta-se o estudo laboratorial desenvolvido com a aplicação dos dois métodos de compactação, o método Marshall e o compactador de rolo.

3.2 SELEÇÃO DE MATERIAIS

3.2.1 Tipo de mistura

Neste trabalho foi estudada a mistura betuminosa do tipo AC 14 surf 35/50 (Quadro 3).

Quadro 3 – Mistura Betuminosa utilizada nos estudos (EP, 2012)

Designação das Misturas Betuminosas			
Normas	Camada	Designação anterior	Designação actual
NP EN 13108-1	Desgaste	Betão Betuminoso	AC 14 surf ligante (BB)
		Betão Betuminoso Rugoso	AC 14 Desgaste surf ligante (BBr)
		(micro) Betão Betuminoso Rugoso	AC 10 surf ligante (mBBr)

AC – designação do produto, cujo termo em inglês é “Asphalt Concrete”;

14 – Agregado cuja abertura do peneiro superior é igual a 14mm;

ligante – classe a definir ;

surf – referente à camada de desgaste, cujo termo em inglês é “surface course”.

Embora não seja objetivo deste trabalho formular uma mistura betuminosa, cujo estudo seja transposto para uma central de produção, é de todo o interesse

observar se na obtenção da fórmula de trabalho, todos os parâmetros de exigência do CEEP são verificados com os resultados obtidos. Exigências como as limitações do fuso granulométrico dos agregados (Quadro 4) e propriedades finais da mistura (Quadro 6) são referenciadas no CEEP (EP, 2012).

3.2.2 Seleção dos agregados

Os critérios de seleção dos agregados são estabelecidos com base na experiência anterior e nos limites mínimos de qualidade para as características físicas dos agregados. Estas variam consoante o tipo de MB e de acordo com as funções que a camada a construir vai desempenhar no pavimento.

Neste trabalho foram utilizados agregados naturais basálticos e calcários. Nos estudos de formulação efetuados, os agregados naturais foram recolhidos diretamente de pilhas de armazenamento em estaleiro (Figura 11), transportados, armazenados e trabalhados nas instalações do LNEC (Figura 12).



Figura 11 – Recolha dos agregados no estaleiro

Quando os materiais granulares disponíveis não cumprem integralmente as especificações, estes podem ser aceites ou rejeitados consoante a importância relativa que for atribuída às propriedades não conformes (Capitão 2003).

Os agregados são materiais com forma e volume aleatórios, detentores de dimensões e propriedades adequadas para determinados fins da construção. São de custo relativamente reduzido, sendo este um dos motivos para a sua utilização.

As especificações aplicáveis impõem requisitos mínimos no que respeita as diversas propriedades, tais como a granulometria, a limpeza, a resistência mecânica ao desgaste e ao polimento, a forma e a adesividade ao betume.

Os agregados são inicialmente selecionados pela granulometria em função da possibilidade de participar ou não na composição da mistura de agregados, e posteriormente avaliados pelas suas características físicas e mecânicas, de modo a atender às especificações vigentes.



Figura 12 – Aspeto panorâmico da sala de caracterização de solos e agregados

Atendendo à finalidade deste trabalho, os agregados utilizados na formulação das misturas betuminosas não foram sujeitos, em laboratório, a todos os ensaios de caracterização física que o CEEP impõe, por forma a validar a sua adequabilidade para a sua utilização.

Definiram-se as misturas de agregados, partindo-se dum fuso granulométrico preestabelecido pelo CEEP o qual limita superior e inferiormente o traçado das curvas granulométricas que resultam da combinação das várias classes de agregados disponíveis.

A mistura betuminosa estudada é designada como AC14 surf 35/50, BB, e na sua constituição foram utilizados as frações que se apresentam em seguida:

- Brita basáltica 10/16
- Brita basáltica 4/12
- Pó calcário 0/4
- Pó basáltico 0/4
- Filer comercial

3.2.3 Granulometrias dos agregados

De todas as caracterizações que o CEEP impõe para garantir que os agregados são aptos, apenas foram realizadas neste estudo as granulometrias dos agregados, (Figura 13) em que o ensaio consiste na separação, por meio de um

conjunto de peneiros, em diversas classes granulométricas de granulometria decrescente (EP, 2012).

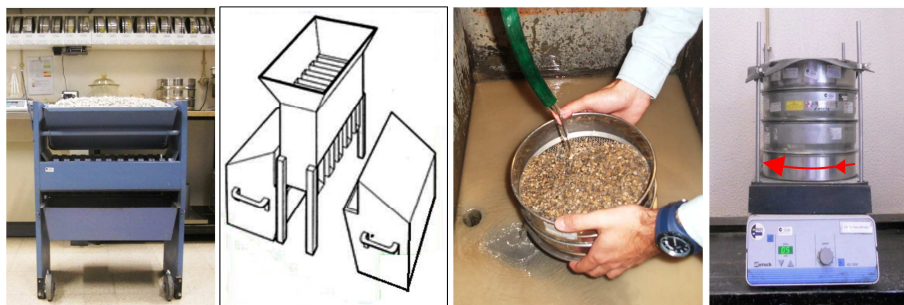


Figura 13 – Esquartelamento, lavagem e peneiração mecânica a seco dos agregados

Os agregados selecionados foram caracterizados pelas respetivas análises granulométricas (Figura 14), segundo a norma de ensaio EN 933-1.

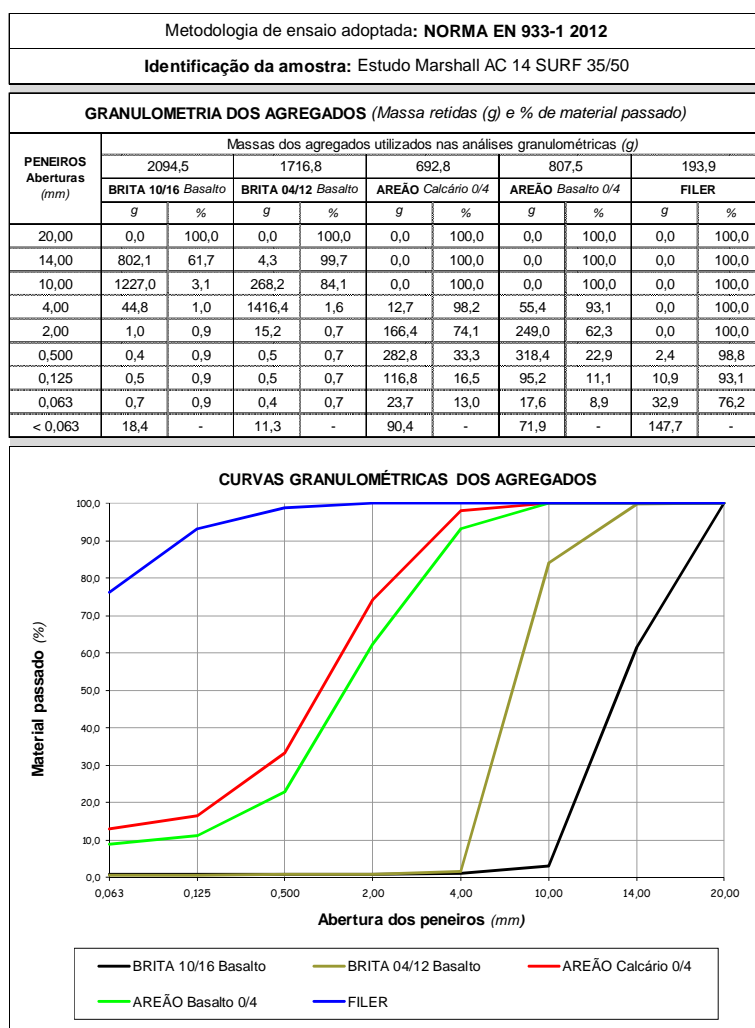


Figura 14 – Análise e curvas granulométricas dos agregados utilizados

A série de peneiros utilizada foi a série (base + 2), com lavagem seguida de peneiração a seco, antecedidas pelo processo de verificação da massa constante do provete, após pesagem em estufa.

As curvas granulométricas são fundamentais para apreciar rapidamente a granulometria do agregado e eventuais deficiências que possa ter a nível de certas frações granulométricas, como por exemplo a falta de partículas de uma dada dimensão.

3.2.4 Percentagem dos agregados na composição da mistura

Na fabricação da mistura AC 14 surf 35/50, comercialmente designada como BB (Betão Betuminoso), o CEEP impõe para fabrico da camada de desgaste, os seguintes requisitos gerais (Quadro 4 e Quadro 6).

Quadro 4 – Requisitos para o fuso granulométrico (EP, 2012)

Peneiros série base + 2 (mm)	20,0	14,0	10,0	4,0	2,0	0,5	0,125	0,063
% Passada	100	90-100	67-77	40-52	25-40	11-19	6-10	5-8

A combinação de dois ou mais agregados, com diferentes granulometrias, para obter uma mistura com uma granulometria específica destinada à fabricação de uma mistura betuminosa, é uma situação normal na construção de pavimentos. A determinação relativa da soma de vários agregados, necessários para obter o desejado fuso granulométrico, é uma questão de proporções que pode ser resolvido através de métodos gráficos, analíticos automáticos ou através de um método analítico por tentativas.

Nenhuma percentagem encontrada poderá sair dos limites granulométricos estabelecidos, e como se torna fácil perceber, poderão vir a ser encontradas um elevado número de combinações granulométricas percentuais aceitáveis. Uma combinação ótima será aquela na qual as percentagens obtidas estão dentro dum ajuste tão apertado quanto possível da desejada percentagem granulométrica estabelecida e que corresponde à linha média do fuso granulométrico.

Existem sofisticados processos matemáticos desenvolvidos para determinação duma combinação ótima de agregados. Contudo, um método de tentativas conduzido por um raciocínio lógico, apoiado e desenvolvido em folhas de cálculo automático, é o procedimento mais confortável para determinar uma satisfatória combinação percentual dos agregados.

Foram desenvolvidos vários métodos gráficos para determinação da desejada curva granulométrica, através de combinações de agregados com diferentes granulometrias. Tal como os métodos matemáticos, alguns métodos gráficos são igualmente complicados, e quando o número de agregados a serem combinados aumenta, o grau de dificuldade, para determinação da curva pelo método gráfico, aumenta também. Os métodos gráficos, praticamente não são utilizados no âmbito nacional no estudo da composição de agregados para formulação de MBQ.

Neste trabalho foi utilizado o método analítico por tentativas (Figura 15) baseado no método do *Asphalt Institute* (The Asphalt Institute, 1971) e o cálculo foi desenvolvido numa folha do Excel, concebida para o efeito (Figura 15).

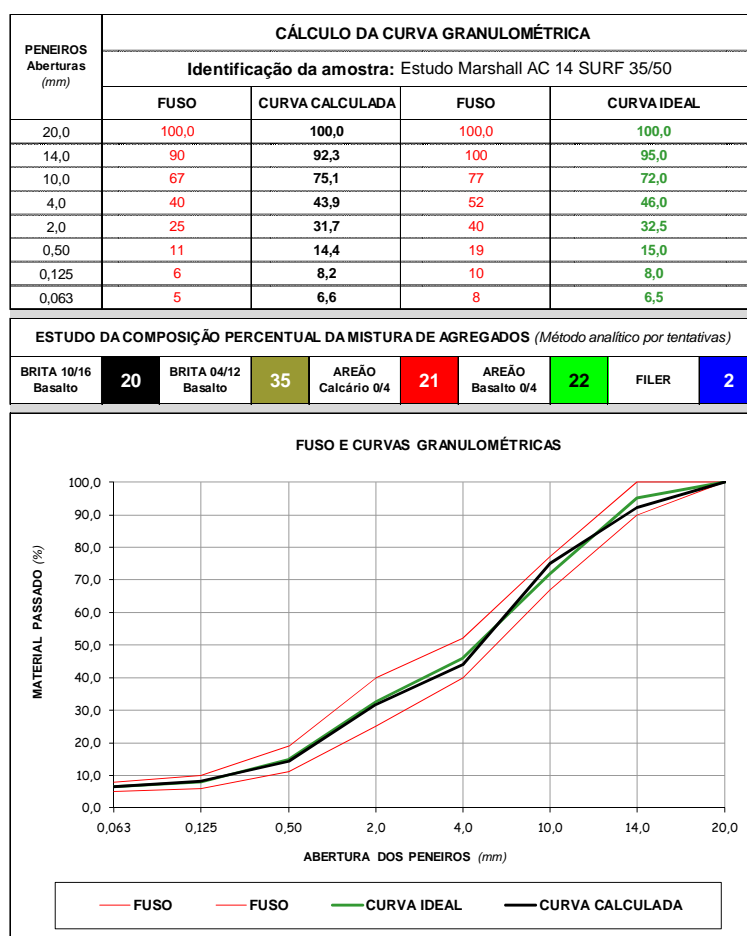


Figura 15 – Determinação de uma das possíveis curvas granulométricas

O procedimento por tentativas para alcance dos objetivos é extremamente simples, conseguindo-se o acompanhamento visual do ajuste da curva granulométrica a estudar, à curva granulométrica pretendida.

Em função do fuso granulométrico pretendido e de acordo com os resultados obtidos nas análises granulométricas efetuadas a cada um dos agregados, fez-se o dimensionamento de uma das muitas possíveis curvas granulométricas da mistura de agregados.

O resultado para a combinação de agregados sem ligante, vulgarmente conhecida como mistura seca, será um conjunto composto pelas seguintes partes percentuais:

- Brita basáltica 10/16 - 20,0%.
- Brita basáltica 4/12 - 35,0%.
- Pó calcário 0/4 - 21,0%
- Pó basáltico 0/4 - 22,0.
- Filer comercial - 2,0%

Esta foi a combinação percentual de agregados utilizada nos dois estudos de formulação analisados neste trabalho.

3.2.5 Seleção do betume

O betume utilizado foi um betume de penetração nominal 35/50 cujas características são as constantes da ficha técnica apresentadas pelo fabricante (Quadro 5).

Quadro 5 – Características técnicas do betume utilizado

Propriedades	Método de ensaio	Unid.	Especificação	
			Mínimo	Máximo
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s	EN1426	dmm	35	50
Temperatura de amolecimento, A & B	EN1427	°C	50	58
Índice de penetração	Anexo A	°C	-1,5	+0,7
Temperatura de fragilidade Fraass	EN12593	°C		-5
Viscosidade cinemática, a 135 °C	EN12595	mm²/s	370	
Solubilidade em tolueno ou xileno	EN12592	%	99,0	
Temperatura de inflamação	EN ISO2592	°C	240	
Resistência ao envelhecimento, a 163 °C	EN12607-1			
Variação de massa		%		0,5
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s	EN1426	%	53	
Aumento da temperatura de amolecimento (Sev.2)	EN1427	°C		11

Os ligantes betuminosos a empregar no fabrico de misturas betuminosas devem estar definidos no projeto de execução e a razão da escolha deve ser devidamente justificada. São empregues, essencialmente, em misturas betuminosas fabricadas a quente, para aplicação em camadas de base, de ligação, de regularização e de desgaste. São, também, usados no fabrico de mástiques betuminosos, em revestimentos superficiais e no envolvimento de gravilhas duras para incrustação no final do acabamento da camada de desgaste.

No presente estudo calculou-se a quantidade de betume necessário para a realização dos estudos de formulação previstos e recolheram-se as amostras em reservatórios de 5 litro. Em laboratório, aqueceu-se o betume a uma temperatura de 110°C em estufa, tendo este sido em seguida dividido em frações de 1,0 e 0,5 litro (Figura 16), por forma a garantir que em todas as misturas betuminosas a fabricar o betume teria sempre as mesmas fases de aquecimento.



Figura 16 – Armazenamento do betume em latas de 0,5 e 1,0 litro

3.3 ESTUDO MARSHALL

3.3.1 Requisitos

O anexo nacional da NP EN 1308-1 recomenda que a formulação em laboratório de MBQ seja efetuada com base no método Marshall, descrevendo também o método a seguir e os ensaios complementares ao estudo.

O método de dosagem Marshall para misturas betuminosas é ainda o mais utilizado podendo considerar-se quase como um método universal. Foi concebido no decorrer da 2ª Guerra Mundial como um procedimento para definir a proporção de agregado e ligante capaz de resistir às cargas de roda e à pressão de pneus das aeronaves militares (Swiertz et al., 2010).

Aplica-se ainda o método de Marshall, embora apenas com o intuito de estimar a quantidade de betume e não como método de formulação propriamente dito. Como é corrente, tal estimativa baseia-se, no valor da baridade, estabilidade, e porosidade da mistura betuminosa em estudo, não contabilizando qualquer ensaio de desempenho.

Quadro 6 – Requisitos e propriedades da mistura (EP, 2012)

Moldagem de provetes com 75 pancadas em cada face			
Características Marshall EN NP 12697-34	Estabilidade (<i>kN</i>)	Miníma	7,5
		Máxima	15,0
	Deformação (<i>mm</i>)	Miníma	2,0
		Máxima	4,0
Valor mínimo de vazios na Mistura de Agregados (VMA) EN NP 12697-8	(%)	14	
Porosidade EN NP 12697-8	(%)	Miníma	3,0
		Máxima	3,0
Índice de Resistência Conservada (IRC_{min}) em ensaio de compressão Marshall MIL - STD-620A	(%)	80	
Quociente Marshall	$kN.mm^{-1}$	$Q_{min}3$	
IRC (Índice de Resistência Conservada)	(%)	80	
Mínimo de ligante	(%)	4,0	

3.3.2 Percentagens de betume

Numa primeira fase, a determinação da percentagem residual de ligante (Delorme et al., 2007) foi baseada no conceito de "Modulo de Riqueza", cuja abordagem se relaciona com a espessura da película de betume e o que torna o requisito independente da curva granulométrica da mistura.

A fim de estar de acordo com as normas europeias presentemente em vigor, os requisitos foram traduzidos em "conteúdo em ligante". No caso de uma abordagem empírica, o valor da percentagem mínima de betume - $P_{b(min)}$ - e o valor do módulo de riqueza são dados para cada tipo de mistura betuminosa a fabricar e apresentados em tabelas de referência.

No presente estudo, para uma mistura betuminosa do tipo AC14 surf 35/50, seguiu-se a recomendação do CEEP que determina como percentagem mínima de betume o valor de 4,0%. Este será o valor do qual serão fabricadas mais quatro misturas betuminosas, com incrementos sucessivos de 0,5 % de betume, até 6,0%, num total de cinco percentagens de betume.

No entanto, convém realçar que, e também segundo o CEEP quando este valor inicial de betume não é imposto, poderemos recorrer ao formulário de Duriez (EP, 2012) no qual a percentagem mínima de betume residual é escolhida em função da superfície específica dos agregados.

O método de cálculo é traduzido pela seguinte expressão:

$$P_{b(min)} = K \times \alpha \times (\Sigma)^{0,2}$$

Sendo:

$P_{b(min)}$ – Percentagem mínima de betume residual a utilizar;

K – Módulo de riqueza em ligante com os valores limite em função da camada de aplicação;

Com,

$$\alpha = \frac{2,65}{\rho_a},$$

Sendo ρ_a a massa volúmica em g/cm³, da mistura de agregados;

$$\Sigma = \frac{1}{100} \times (0,25G + 2,3S + 12s + 135f)$$

Em que:

Σ – Superfície específica (m^2/kg)

G – Proporção ponderal de elementos superiores a 6,3mm

S – Proporção ponderal de elementos compreendidos entre 6,3 e 0,315mm

s – Proporção ponderal de elementos compreendidos entre 0,315 e 0,063mm

f – Proporção ponderal de elementos inferiores a 0,063mm

Este cálculo não é aplicável quando a mistura betuminosa a fabricar contém elementos especiais finos ou aditivos, tais como fibras.

3.3.3 Ensaio de caracterização do betume

O betume foi caracterizado laboratorialmente através dos ensaios de penetração (NP EN 1426) e de temperatura pelo método do “Anel e Bola” (NP EN 1427) (Figura 17).

Os resultados obtidos foram um índice de penetração de 40 e uma temperatura de amolecimento de 56°C, valores que enquadram o betume estudado na classe dos betumes de penetração nominal 35/50 (INIR, 2013).



Figura 17 – Ensaio de caracterização do betume. Penetração e de Anel e Bola

3.3.4 Composição “farmacêutica” dos provetes Marshall

Com exceção do filer, os restantes quatro agregados que constituíam a mistura betuminosa em estudo, foram separados por peneiração, após lavagem e secagem em estufa e agrupados por frações granulométricas (Figura 18). Na composição dos provetes, o filer entrou como substituição do material passado no peneiro de 0,063 mm.

Para o estudo Marshall foram adicionadas às dosagens de agregados as seguintes percentagens de betume: 4,0%; 4,5%; 5,0%; 5,5% e 6,0%.




Figura 18 – Separação por frações de todos os agregados

Após a caracterização dos agregados, as suas percentagens ativas na composição da mistura, do tipo de betume a utilizar e a definição das respetivas percentagens, seguiu-se a composição dos provetes a moldar, segundo o método Marshall.

Para o cálculo da composição dos provetes, foram considerados como condicionantes as percentagens dos agregados calculados e as percentagens de betume impostas para o estudo de uma mistura betuminosa do tipo AC 14 SURF 35/50 (vd. 3.3.2).

Na composição dos provetes foi utilizada o método designada por “farmacêutico” (Quadro 7), recorrendo à pesagem individual de cada uma das frações retidas em cada um dos peneiros considerados na série (base + 2) (Quadro 4).

Quadro 7 – Dosagens dos provetes tipo “farmacêutica”

COMPOSIÇÃO DOS PROVETES MARSHALL											
BETUME (%)		4,0		4,5		5,0		5,5		6,0	
BASALTO	 (mm)	g	Parciais	g	Parciais	g	Parciais	g	Parciais	g	Parciais
			TOTAIS		TOTAIS		TOTAIS		TOTAIS		TOTAIS
	> 14,0	90,7		90,3		89,8		89,3		88,8	
	> 10,0	201,3	292,0	200,2	290,5	199,2	288,9	198,1	287,4	197,1	285,9
	> 4,0 (G)	343,2	635,2	341,4	631,9	339,6	628,6	337,8	625,3	336,1	622,0
	> 4,0 (F)	17,7	652,9	17,6	649,5	17,5	646,1	17,4	642,7	17,3	639,3
	> 2,0	83,2	736,1	82,8	732,2	82,3	728,4	81,9	724,6	81,5	720,7
	> 0,5	101,8	837,8	101,2	833,5	100,7	829,1	100,2	824,7	99,6	820,4
	> 0,125	30,6	868,4	30,4	863,9	30,2	859,3	30,1	854,8	29,9	850,3
	> 0,063	5,8	874,2	5,8	869,6	5,7	865,1	5,7	860,5	5,7	856,0
Filer REC	27,7	901,9	27,6	897,2	27,4	892,5	27,3	887,8	27,1	883,1	
CALCÁRIO	> 4,0 (F)	4,5	906,4	4,5	901,7	4,5	896,9	4,4	892,2	4,4	887,5
	> 2,0	59,1	965,5	58,8	960,4	58,5	955,4	58,2	950,4	57,8	945,3
	> 0,5	100,4	1065,8	99,9	1060,3	99,4	1054,7	98,8	1049,2	98,3	1043,7
	> 0,125	41,5	1107,3	41,2	1101,5	41,0	1095,8	40,8	1090,0	40,6	1084,2
	> 0,063	8,4	1115,7	8,4	1109,9	8,3	1104,1	8,3	1098,3	8,2	1092,5
	FILER	55,2	1171,0	54,9	1164,9	54,7	1158,8	54,4	1152,7	54,1	1146,6
	TOTAIS (g)		1 220		1 220		1 220		1 220		1 220

Foi composto um primeiro provete sem betume, tendo-se verificado a sua composição granulométrica, recorrendo (Figura 19) à lavagem dos agregados, secagem em estufa até massa constante e peneiração (Figura 13).

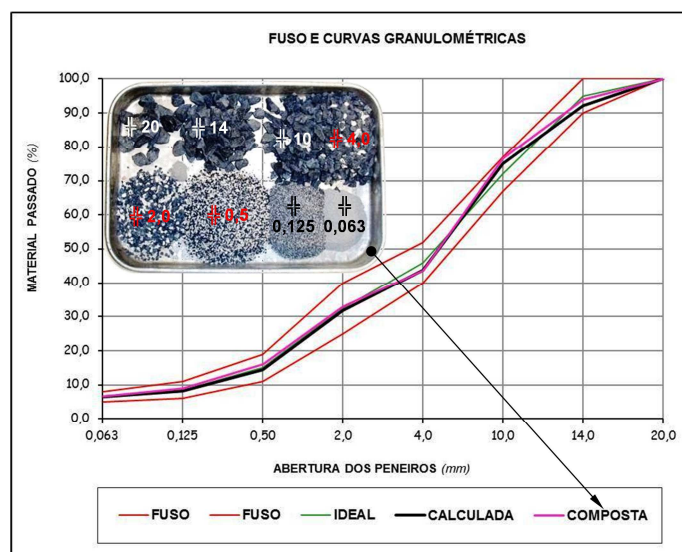


Figura 19 – Granulometria composta. Separação de frações e curva granulométrica

A vantagem deste método, em relação ao método de divisão dos agregados recorrendo ao esquartelamento (Figura 13), é a de garantir a homogeneidade física dos provetes e dos resultados dos ensaios a que os provetes são sujeitos. Esse método torna-se ainda mais importante no caso dos provetes Marshall devido às reduzidas dimensões dos mesmos.

Verifica-se pelo gráfico da curva granulométrica (Figura 19) que, com a introdução do filer, considerando-o como material passado no peneiro de 0,063 mm, não se alterou significativamente a curva granulométrica final pretendida.

Para a composição dos provetes segundo o método proposto ("farmacêutica"), recomenda-se o uso de duas balanças (Figura 20) para a preparação dos provetes. Uma para as pesagens parciais retidas em cada fração e outra, em simultâneo, para as pesagens dos totais acumulados. Este método proporciona a redução quase total do erro associado à preparação das amostras.



Figura 20 – Composição “farmacêutica” dos provetes e conjuntos preparados

No presente estudo foram preparadas vinte amostras (Figura 20), correspondentes a cinco percentagens de betume, com quatro provetes por cada percentagem de betume.

Este método de composição, designada pelo autor como “farmacêutico”, foi estudado particularmente para este trabalho e considera-se como uma mais-valia para uma composição uniforme de agregados, seja qual for o fim a que se destinem (Quadro 7).

3.3.5 Fabrico dos provetes Marshall

O fabrico dos provetes para a execução do estudo Marshall foi realizado segundo a norma EN 12697-30, tendo sido utilizado o compactador de impacto mecânico (Figura 3) com a aplicação de 75 pancadas em cada topo do provete (NP EN 13108-1 NA).

As temperaturas de ensaio foram as recomendadas pelo fabricante do ligante, tal como indicado no Quadro 1. Para o betume de penetração nominal 35/50 a temperatura de mistura foi de 160 a 170°C e a temperatura de compactação foi de 150 a 160°C.

Na Figura 21 apresentam-se os diversos equipamentos de ensaio utilizados no estudo realizado.



Figura 21 – Aspeto panorâmico da sala de ensaios de misturas betuminosas

Quadro 8 – Informação técnica da fabricante relativa às várias temperaturas

Tipo de betume	Temperatura mínima de bombagem (°C)	Temperatura de mistura (°C)	Temperatura de aplicação e compactação (°C)
Pavimentação			
10/20	140	180-190	170-180
35/50	125	160-170	150-160
50/70	120	155-165	145-155
70/100	115	150-160	140-150
160/220	105	130-140	125-135

No CEEP também é referido que as temperaturas de mistura e compactação do betume deverão corresponder, respetivamente, às viscosidades cinemáticas de $170 \pm 20 \text{Cst}$ e $280 \pm 30 \text{Cst}$. Caso não sejam conhecidos os valores das viscosidades dos betumes, deve-se recorrer a ábacos próprios (OSU, 2012) que relacionam penetração com a viscosidade e a temperatura (Figura 2).

Para a moldagem dos provetes é recomendável a disponibilização de duas estufas e uma misturadora elétrica com base aquecida (Figura 22), sendo que todas as temperaturas deverão ser controladas.

Uma das estufas será utilizada para aquecimento do betume e outra para aquecimento dos agregados, moldes e outros utensílios metálicos utilizados no fabrico da mistura betuminosa.

É recomendável que, quando do fabrico da mistura betuminosa, esta seja sempre efetuada em ambiente aquecido por uma manta elétrica (Figura 23).

É recomendável também a utilização de uma placa elétrica para aquecimento da base do pilão do compactador de impacto a 100°C, só utilizada na primeira compactação (Figura 23).



Figura 22 – Exemplo do controlo de temperaturas de estufas e manta elétrica

No presente estudo foram moldadas cinco séries de provetes correspondentes às cinco percentagens referenciadas (vd 3.3.4) e em cada série quatro provetes, num total de vinte provetes (Figura 23). Após a moldagem de cada série, os provetes foram adequadamente identificados para que não sejam criadas dúvidas acerca das suas características.

Todos os ensaios foram realizados nos prazos de tempo previsto na NP EN 12697 – 34, tentando-se assim minorar quaisquer procedimentos conducentes a uma possível dispersão dos resultados.

3.3.6 Ensaios de caracterização física dos provetes Marshall

Após desmoldagem, limpeza e identificação dos provetes (Figura 23) compactados pelo método Marshall, foram executados os seguintes ensaios de caracterização:

- Baridade imersa (NP EN 12697 – 6)
- Estabilidade e deformação Marshall (NP EN 12697 – 34)
- Baridade Máxima Teórica (NP EN 12697 – 5)



1 – Pesagem do betume 2 – Misturar 3 – Colocação da mistura no molde
4 – Controlo da temperatura na mistura 5 – Aquecimento do pilão
6 – Compactação 7 – Provetes moldados

Figura 23 – Sequência do fabrico dos provetes Marshall

A baridade imersa define uma massa por unidade de volume, incluindo os vazios preenchidos com ar, de um provete a uma temperatura de ensaio conhecida. Neste trabalho foi utilizado o método do provete saturado com a superfície seca (SSD) (Figura 24), onde a massa do provete é obtida pela pesagem do provete seco ao ar, depois o provete é saturado em água e em seguida a sua superfície é seca com uma camurça húmida.

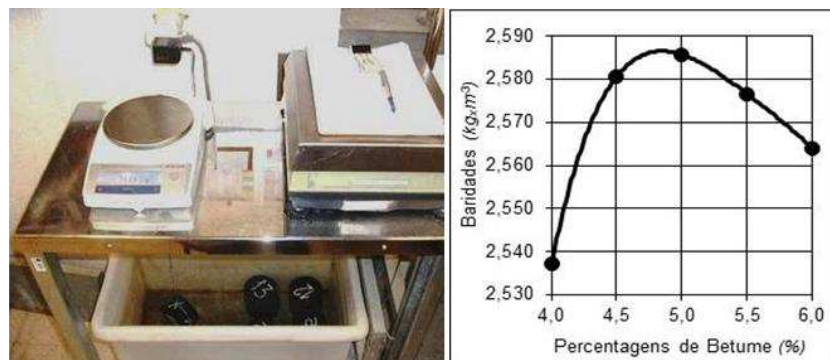


Figura 24 – Determinação da baridade imersa e apresentação de resultados

O método Marshall requer o fabrico de provetes em laboratório para determinação da sua estabilidade e deformação, permitindo juntamente com outros parâmetros, seleccionar a percentagem ótima de betume a utilizar no fabrico de uma mistura betuminosa.

Os provetes moldados com várias percentagens de betume foram ensaiados à compressão Marshall após imersão em água num banho-maria a 60°C durante 40 minutos (Figura 25).



Figura 25 – Banho-maria e controlo da temperatura

No ensaio de estabilidade e deformação Marshall (Figura 26) determina-se, com a aplicação de uma carga crescente, o valor da força de rotura, expressa em kN, bem como a correspondente deformação máxima, apresentada em mm,

A carga máxima atingida representa a estabilidade da mistura apenas nos casos em que a altura do provete é igual a 63,5mm. Quando tal não acontece, um de dois fatores de correção, apresentados a seguir, poderá ser aplicado.

Se a correção for feita pela medição altura média dos provetes o fator a multiplicar será dado pela expressão $c = 5,2e^{-0,0258h}$. Se a correção for feita pelo volume dos provetes o fator a multiplicar será dado pela expressão $c = 5,24e^{-0,0032v}$ (NP EN 12697-34).

Em que:

c – Fator de correção;

h – Altura média do provete em milímetros (mm);

v – Volume do provete determinado em (Figura 24), em mililitros (ml).

As correções fora do leque de variação das alturas dos provetes de 60.5mm até 66.5mm poderão levar a resultados pouco precisos.

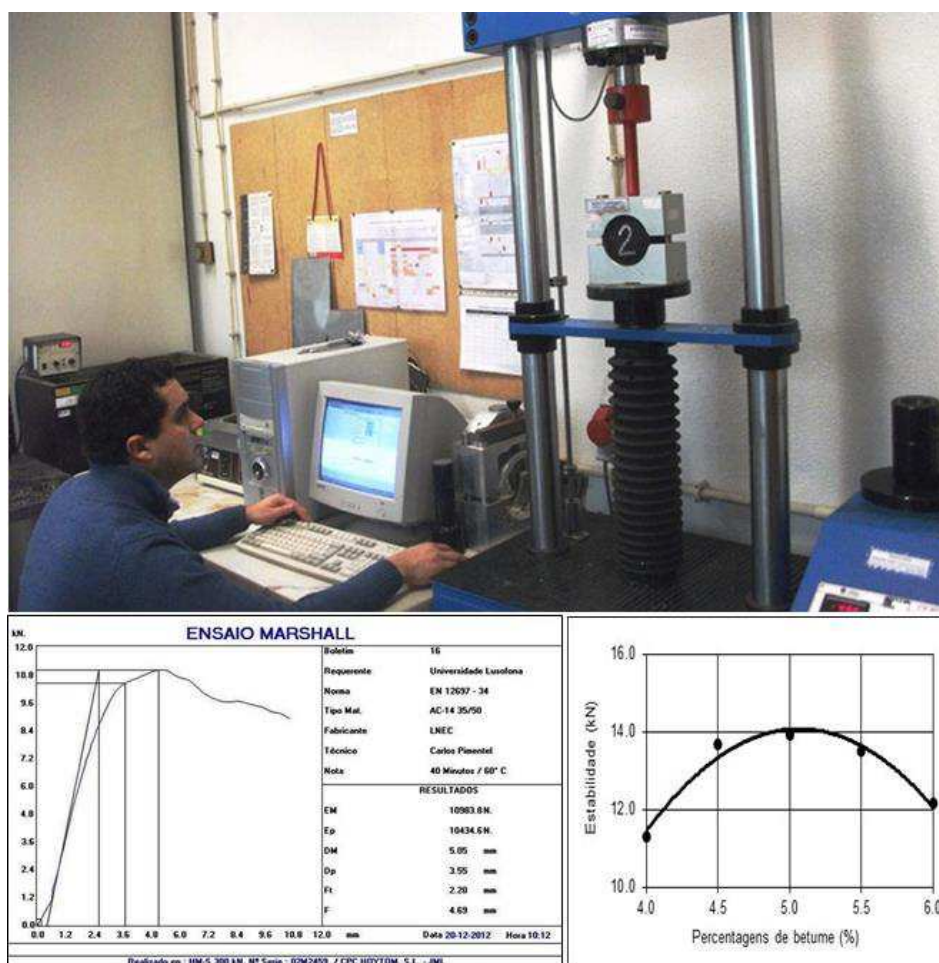


Figura 26 – Ensaio de rotura Marshall e resultados

A Baridade Máxima Teórica (BMT) supõe uma baridade da mistura sem vazios, determinada experimental ou analiticamente e seu valor tende a diminuir quando se aumenta a percentagem de betume na mistura betuminosa. Tal facto deve-se ao aumento da percentagem de betume na mistura betuminosa, implicando uma redução da percentagem de agregado (Quadro 7), ou seja, quando se aumenta um componente na mistura betuminosa com menor massa volúmica (betume) estão a reduzir-se os componentes com maior massa volúmica (agregados), implicando que a BMT (Figura 27) diminua.

A caracterização da BMT é um ensaio de simples execução, no qual, devido a essa imagem de simplicidade poderá transformar-se no centro das dúvidas no estudo de formulação Marshall. A sua “complexa simplicidade” nunca deverá dispensar o

conhecimento da sua função e os pormenores de execução nunca deverão ser menosprezados durante todo o processo a desenvolver.

As amostras ensaiadas para determinação das BMT por cada percentagem de betume, foram resultantes da média física dos quatro provetes ensaiados à compressão.

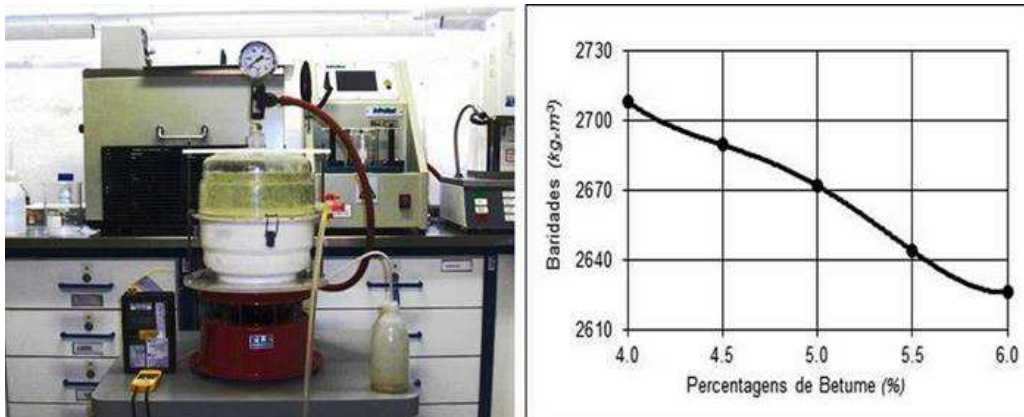


Figura 27 – Determinação da BMT experimental e resultados

A determinação experimental da BMT é de importância relevante na determinação da percentagem ótima de betume usando o método de formulação Marshall.

Analiticamente a BMT pode ser calculada através da seguinte fórmula:

$$\gamma_{mtf} (g \times cm^{-3}) = \frac{100}{\sum \left(\frac{P_c}{M_{vc}} \right)}$$

Em que:

γ_{mtf} – Baridade Máxima Teórica

P_c – Percentagem do componente que entra na composição

M_{vc} – Massa volúmica do componente que entra na composição

3.3.7 Determinação da percentagem ótima de betume

A percentagem ótima de betume, de acordo com a NP EN 13108-1 Anexo Nacional, é calculada com base nos resultados combinados dos ensaios de estabilidade Marshall, da baridade imersa e da porosidade (Figura 28).

Os valores que dão origem aos gráficos da Figura 28 estão representados no Quadro 9 e são relativos aos valores médios obtidos nos ensaios laboratoriais

efetuados aos provetes. Os valores apresentados a vermelho não cumprem com os valores exigidos no CEEP (Quadro 6).

O método Marshall foi desenvolvido durante a Segunda Guerra Mundial, sendo que desde então tem sido modificada e completada para enfrentar novas preocupações, mas o equipamento de testes básicos e os critérios de seleção para a determinação da percentagem ótima de betume, continuam a ser os mesmos (NP EN 13108-1 NA). No entanto, o método Marshall, apesar das suas deficiências, é provavelmente o método de formulação de misturas betuminosas mais utilizado em todo o mundo.

No conjunto dos seis gráficos representativos das características dos provetes Marshall (Figura 28), três representam os valores médios dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais (Murphy & Bentsen, 2001) e os restantes três representam valores de cálculo.

Porosidade:

$$n (\%) = \frac{\gamma_{mtf} - \gamma_{bf}}{\gamma_{mtf}} \times 100$$

Teor volumétrico em betume:

$$T_{vb} (\%) = \frac{\gamma_{bf} \times P_b}{\gamma_{bet}} \times 100$$

VMA: Volume de vazios no esqueleto da mistura compactada

$$VMA (\%) = n + T_{vb}$$

Grau de saturação em betume:

$$S_{atb} (\%) = \frac{T_{vb}}{n + T_{vb}} = \frac{T_{vb}}{VMA}$$

Em que:

n – porosidade

γ_{mtf} – BMT

γ_{bf} – Baridade imersa

T_{vb} – m

P_b – Percentagem de betume

γ_{bet} – Massa volúmica do betume

Quociente Marshall:

$$Q \text{ (kN.mm}^{-1}\text{)} = \frac{F}{S}$$

Quadro 9 – Resumo dos resultados médios dos ensaios aos provetes Marshall

Percentagem de betume (P_b)	(%)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Baridade imersa (γ_b)	(kg.m^{-3})	2537	2581	2586	2577	2564
Força de rotura (S)	(kN)	11,3	13,7	13,9	13,5	12,2
Deformação (F)	(mm)	2,1	2,6	3,6	4,3	4,8
Baridade Máxima Teórica de ensaio (γ_{bmt})	(kg.m^{-3})	2709	2690	2672	2644	2626
Porosidade (n)	(%)	6,3	4,1	3,2	2,6	2,4
Vazios na Mistura de Agregados (VMA)	(%)	16,2	15,4	15,8	16,4	17,4
Teor Volumétrico em betume (T_{vb})	(%)	9,9	11,3	12,6	13,8	15,0
Saturação em betume (S_{atb})	(%)	61,0	73,6	79,6	84,4	86,4
Quociente Marshall (Q)	(kN.mm^{-1})	5,3	5,2	3,9	3,2	2,5

A percentagem ótima de betume da mistura betuminosa em estudo, é determinada a partir dos seguintes gráficos (NP EN 13108-1 NA):

- Percentagem de betume / Estabilidade
- Percentagem de betume / Baridade
- Percentagem de betume / Porosidade

Nos gráficos respeitantes à estabilidade e à baridade (Figura 28), a determinação é efetuada no ponto onde se dá a inversão da curva característica, e no gráfico das porosidades a determinação é efetuada pela interceção da média das porosidades estabelecidas (NP EN 13108-1 NA) e a curva típica do gráfico., 4% (Quadro 6)

Os esquadros e números a vermelho representam os valores a retirar dos gráficos e os esquadros e números a verde as verificações efetuadas conforme o estabelecido no Quadro 6.

Como resultado do estudo de formulação Marshall desta mistura betuminosa, obtivemos uma percentagem de betume considerada ótima, através dos ensaios empíricos, não comparativos, da força de rotura e deformação, baridade imersa e BMT. Destes dois últimos ensaios resulta o cálculo da porosidade.

O valor da percentagem ótima de betume será obtido pela média aritmética do somatório dos seguintes valores:

- Maior valor obtido do gráfico das baridades → (4,9%)
- Maior valor obtido do gráfico da estabilidade → (5,1%)

- Valor intermédio entre o valor máximo (5,0%) e mínimo (3,0%) da porosidade desejada (Quadro 6) → (4,6%)

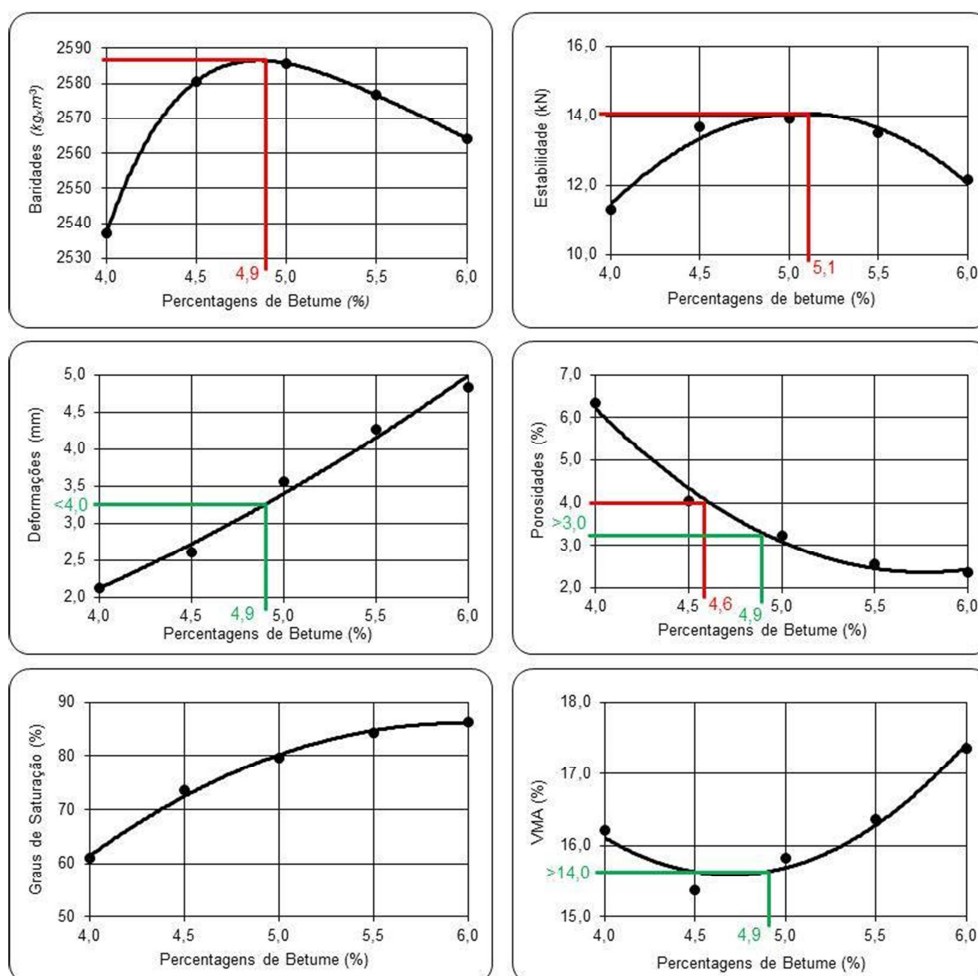


Figura 28 – Características gráficas dos provetes Marshall

O valor da percentagem ótima de betume será obtido pela expressão $\frac{4,9+5,1+4,6}{3}$, à qual corresponde a percentagem de 4,9% de betume.

Com a obtenção desta percentagem a fórmula de trabalho respeitante à mistura betuminosa AC 14 SURF 35/50 será a seguinte:

- Brita 10/16 Basalto – 19,0%
- Brita 04/12 Basalto – 33,3%
- Areão Calcário 0/4 – 20,0%
- Areão Basalto 0/4 – 20,9%
- Filer – 1,9%

- Betume – 4,9%

Com a fórmula de trabalho obtida neste estudo, foram moldados 16 provetes Marshall destinados a ensaios de caracterização para determinação da resistência conservada (Norma Militar Americana MIL-STD-620A), sensibilidade à água (EN 12697-12) e determinação do módulo de rigidez através de ensaios de tração indireta em compressão diametral (EN 12697-26). Uma das carotes foi cortada segundo a sua altura, para visualização do arranjo das partículas durante a compactação.

De registar que o valor da porosidade na percentagem de 4,9% de betume, corresponde ao valor de $\pm 3,2\%$ (Figura 28), muito perto do limite inferior imposto pelo CEEP.

Em todo o estudo efetuado, com já referido, não existem quaisquer indicadores ou critérios baseados nas propriedades mecânicas dos materiais, ou em características de desempenho da mistura, quando esta entrar em serviço.

Anota-se que, de acordo com uma das diretrizes do Anexo Nacional da NP EN 13108-1, o objetivo final de um estudo de formulação é o de especificar um betão betuminoso em termos de propriedades fundamentais baseadas no desempenho.

3.4 ESTUDO COM O COMPACTADOR DE ROLO

3.4.1 Procedimento de compactação

Tal como referenciado (vd 2.5), o compactador de rolo é um equipamento capaz de compactar lajetas, impondo uma espessura exata pré-definida, o que implica que o utilizador poderá compactar as misturas betuminosas tendo como objetivo uma baridade alvo. As lajetas foram compactadas segundo a EN 12697-33.

O estudo desenvolvido visou propor um novo método de formulação de MBQ, utilizando o compactador de rolo, não se baseando no princípio de uma baridade alvo, mas sim na procura de uma baridade desconhecida. Para tal, houve a necessidade de contornar o princípio de funcionamento do equipamento, bem como pesquisar as forças e o número de passagens a aplicar durante os vários estados de compactação das lajetas, tendo sempre presente a necessidade de simular em laboratório as condições de compactação verificadas em obra.

A primeira preocupação foi a de aferir as características do equipamento, nomeadamente no que se refere às forças aplicadas pelo compactador de rolo. Considerando que as forças de compactação aplicadas em obra podem ser proporcionalmente transferidas para o sistema do compactador de rolo que, deste modo irá reproduzir a realidade das forças, através dos seus vários estados de compactação típica que cada um dos seus níveis representa, referindo-se:

- P1 simula o estado de pré-compactação efetivado pela mesa de compactação da espalhadora;
- P2 reproduz a passagem do cilindro de rolos metálicos de rasto liso a vibrar ou sem vibração;
- P3 simula a passagem dos cilindros de pneus;
- P4 reproduz o acabamento final efetuado pelo cilindro utilizado em P2, sem vibração, retirando os vincos deixados pelo cilindro de pneus.

O Quadro 2 apresenta a relação das pressões possíveis de aplicar no compactador de rolo utilizado.

A confirmação das forças aplicadas, e consequentemente das respetivas pressões, foi feita pela Unidade de Metrologia de Forças do LNEC (UMF), colocando um padrão de forças entre o sector do cilindro de aço (Figura 29) e o trólei deslizante, medindo as forças em função de pressão aplicada.

Ao moldar as lajetas de mistura betuminosa com o compactador de rolo, devem ser definidas as pressões a aplicar nos estados de pressão P1, P2, P3 e P4, as quais deverão ter uma correspondência direta com as forças que se irão gerar durante a compactação realizada em obra.



Figura 29 – Verificação da força aplicada pelo compactador de rolo

Para tal, foram recolhidos os seguintes dados em obra sobre os equipamentos de compactação que se transcrevem para o compactador de rolo e se apresentam no Quadro 10 e no Quadro 11:

Quadro 10 – Conversão dos valores da pavimentadora para o compactador de rolo

PAVIMENTADORA						
Dimensões da mesa (m)	1,20	x	0,45	Massa (kg)	3200	
Velocidade de progressão (m.min ⁻¹)				7		
COMPACTADOR DE ROLO (Simulador da compactação em campo)						
Relação das pressões (bar) a ler no manómetro e a força a aplicar na compactação (N)				1	6154	
Tempo de execução de um ciclo (seg)				8,9		
MOLDE PEQUENO; Dimensões do molde (m)				0,305	x	0,305
Massa da placa a considerar no compactador (kg)					551	
Pressão a aplicar no compactador (bar)					0,9	
Número de ciclos a efetuar (Número inteiro)					0,6	
COM A VIBRAÇÃO LIGADA						
MOLDE GRANDE; Dimensões do molde (m)				0,305	x	0,405
Pressão a aplicar no compactador (bar)					1,2	
Número de ciclos a efetuar (Número par inteiro)					0,8	
COM A VIBRAÇÃO LIGADA						

- Pavimentadora com mesa de compactação com 3200 kg de peso, dimensões de 1,20×0,45 m e com uma velocidade de deslocação de $7m.min^{-1}$
- Cilindro de rolos com 12000 kg de peso e aplicação de 5 passagens
- Cilindro de pneus com 23000 kg de peso e aplicação de 7 passagens

Assim, no que se refere à fase do espalhamento e compactação aplicada pela espalhadora, foram os seguintes os critérios adotados:

- Relacionou-se a velocidade da pavimentadora com a velocidade do compactador de rolo e determinou-se o número de ciclos a efetuar
- As forças verticais aplicadas pela mesa compactadora foram transcritas para o compactador de rolo, relacionando as proporções

Quadro 11 – Conversão de valores dos cilindros para o compactador de rolo

CILINDRO DE PNEUS			
Equipamento	Nº Ciclos	Massa (kg)	Comp (m)
Cilindro / Compactador	7	23000	1,986
COMPACTADOR DE ROLO			
Relação das pressões (bar) a ler no manómetro e a força a aplicar (kg)		1	6154
MOLDE PEQUENO ; Dimensões do molde (m)		0,305 x	0,305
Carga a aplicar no Roller Compactor (N)			17326
Pressão calculada a aplicar no RC (bar)			2,82
MOLDE GRANDE ; Dimensões do molde (m)		0,305 x	0,405
Carga a aplicar no Roller Compactor (N)			23006
Pressão calculada a aplicar no RC (bar)			3,74
CILINDRO DE ROLOS (Acabamento)			
Equipamento	Nº Ciclos	Massa (kg)	Comp (m)
Cilindro / Compactador	5	12000	2,084
COMPACTADOR DE ROLO			
Relação das pressões (bar) a ler no manómetro e a força a aplicar (kg)		1	6154
MOLDE PEQUENO ; Dimensões do molde (m)		0,305 x	0,305
Carga a aplicar no Roller Compactor (N)			8614
Pressão calculada a aplicar no RC (bar)			1,40
MOLDE GRANDE ; Dimensões do molde (m)		0,305 x	0,405
Carga a aplicar no Roller Compactor (N)			11439
Pressão calculada a aplicar no RC (bar)			1,86

Para transpor para o compactador de rolo as forças de compactação dos cilindros que atuam em campo, seguiu-se o mesmo critério (Quadro 11) sendo que, para as pavimentadoras, não se considerou a velocidade de atuação dos cilindros, mas sim a carga pontual aplicada por eixo. Para os dois tipos de cilindros o número de passagens é definido, em vez de ser calculado.

O número de passagens do compactador de rolo a considerar no presente estudo deverá o ser o mesmo a usar pelos cilindros em campo. Deste modo, considera-se que este tipo de estudo laboratorial, com a realização da compactação de misturas betuminosas com o compactador de rolo, poderá dispensar a execução dum troço experimental, uma vez que todos os parâmetros a retirar dele, podem ser perfeitamente definidos no estudo efetuado em laboratório.

3.4.2 Materiais ensaiados

Os agregados utilizados no presente estudo e suas proporções são as mesmas que se utilizaram no estudo Marshall deste trabalho:

- Brita basáltica 10/16 (20,0%).
- Brita basáltica 4/12 (35,0%).
- Pó calcário 0/4 (21,0%)
- Pó basáltico 0/4 (22,0).
- Filer comercial (2,0%)

Para as dosagens do betume, tal como no estudo Marshall, seguiu-se a recomendação do CEEP que determina 4,0% como percentagem mínima de betume para o estudo da mistura AC 14 SURF 35/50, com incrementos sucessivos de 0,5 %, num total de 5 percentagens de betume. Assim as dosagens de betume foram de 4,0%; 4,5%; 5,0%; 5,5% e 6,0%.

Na composição das lajetas (Figura 30) foi também utilizada o método já usada para a composição dos provetes Marshall e que foi designada de “farmacêutico” (vd. 3.3.4 conforme exemplificada no Quadro 7. Neste tipo de composição, só mudam as quantidades parciais e totais dos agregados utilizados.

A vantagem deste método, em relação ao método de divisão dos agregados recorrendo ao esquartelamento (Figura 14), é a de garantir individualmente que cada provete apresente uma constituição igual aos restantes provetes, e proporcione a garantia da homogeneidade física dos provetes e dos resultados dos ensaios a que os provetes são sujeitos. Esse método torna-se ainda mais importante no caso dos provetes Marshall devido às suas reduzidas dimensões.

3.4.3 Preparação de amostras para a caracterização mecânica

Os critérios de formulação de misturas betuminosas propostos no âmbito do desenvolvimento de um novo método passaram pela determinação das capacidades estruturais da mistura betuminosa a fabricar, realizando ensaios de caracterização do módulo de rigidez da mistura, ângulo de corte e resistência ao fendilhamento por fadiga (EN 12697-24), *Wheel Tracking Test* (WTT) resistência à deformação permanente (EN 12697-22) e módulo de rigidez por tração indireta (EN 12697-26).

Assim, e para cada percentagem de betume a utilizar foram fabricadas 4 lajetas agrupadas duas a duas (Figura 30).



1 – Preparação dos agregados 2 – Pesagem do betume 3 – Misturar
4 – Aquecimento do pé do compactador 5 – Colocação da mistura no molde
6 – Pente 7 – Homogeneização da mistura 8 – Compactação
9 – Provete compactado 10 – Desmoldagem do provete

Figura 30 – Sequência de fabrico duma lajeta com o compactador de rolo

As duas primeiras lajetas, com dimensões de 405×305×63mm tiveram as seguintes finalidades:

- Determinação da baridade imersa da mistura para fabrico das lajetas para determinação do comportamento à deformação permanente;
- Corte em vigas com as dimensões de 405×50×50mm (Figura 33) para os ensaios de determinação do módulo de rigidez, angulo de corte e resistência ao fendilhamento por fadiga.

As 10 lajetas com dimensões de 305×305×50mm (Figura 32) foram fabricadas após conhecido o valor das baridades imersas das 10 primeiras lajetas de 405×305×63mm. Conhecida a baridade e o volume do molde, impôs-se ao compactador de rolo uma espessura exata de 50mm e compactou-se para uma baridade alvo.



Figura 31 – Determinação da baridade imersa e apresentação de resultados das lajetas moldadas (405×305×63)mm

Tal como no compactador de impacto, o pé de compactação do compactador de rolo deverá ser aquecido previamente

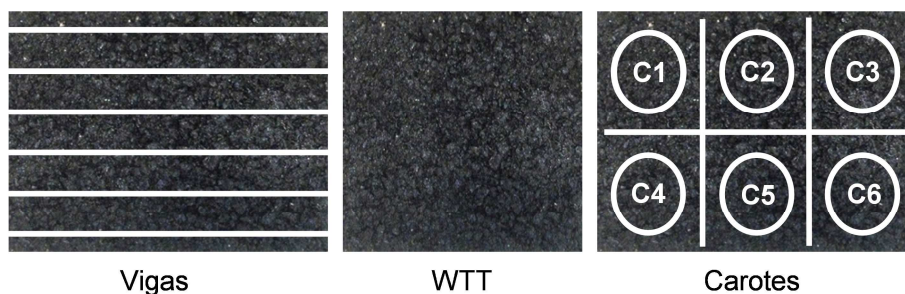


Figura 32 – Aspeto dos vários tipos de lajetas fabricadas e identificação da finalidade dos provetes

Refere-se que, para a moldagem das lajetas é recomendável a existência de duas estufas e uma misturadora com base aquecida (Figura 30), sendo que à semelhança do verificado no método de compactação Marshall todas as temperaturas deverão rigorosamente ser controladas.

Uma das estufas deverá ser utilizada no aquecimento do betume e a outra para o aquecimento dos agregados, moldes e outros utensílios metálicos utilizados no fabrico da mistura betuminosa.

As lajetas destinadas à extração de carotes com as dimensões de 405×305×63mm foram moldadas com a fórmula de trabalho obtida no estudo de formulação Marshall; percentagem ótima de betume 4,9%.

Com as carotes obtidas realizaram-se os ensaios de caracterização para determinação da resistência conservada (Norma Militar Americana MIL-STD-620A), de sensibilidade à água (EN 12697-12) e de determinação do módulo de rigidez através

de ensaios de tração indireta em compressão diametral (EN 12697-26). Uma das carotes de cada um dos tipos de compactação por impacto, em compactador de rolo e em campo foi cortada (Figura 33) para a observação do arranjo interno das partículas ocorrida durante a compactação.



Figura 33 – Corte dos provetes por serragem

As carotes obtidas das lajetas fabricadas em laboratório foram extraídas com uma manga especialmente fabricada para o efeito (Figura 34), atendendo às dimensões do diâmetro interior dos provetes Marshall ($101,6 \pm 0,1$)mm



Figura 34 – Carotagem das lajetas e aspeto da manga com diâmetro Marshall

No presente estudo foram fabricadas 23 lajetas; sendo 13 com as dimensões de 405×305×63mm e restantes 10 lajetas moldadas com as dimensões de 305×305×50 mm.

3.4.4 Caracterização das lajetas moldadas

Através dos ensaios de baridade imersa e dos valores da BMT também utilizados no estudo de formulação Marshall obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 12.

Com os valores obtidos traçaram-se os gráficos correspondentes (Figura 35) onde os valores das porosidades impostas estão referenciados.

Quadro 12 – Resumo dos resultados médios dos ensaios das lajetas moldadas

Percentagem de betume (%)		4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Baridade Máxima Teórica de ensaio ($kg.m^{-3}$)		2709	2690	2672	2642	2631
Baridade imersa ($kg.m^{-3}$)		2566	2590	2601	2607	2588
Porosidade (%)		5,27	3,70	2,64	1,31	1,64
VMA (vazios na mistura de agregados) (%)		15,27	15,05	15,31	15,28	16,76

Os valores indicados a vermelho no quadro, não cumprem com as exigências do CEEP.

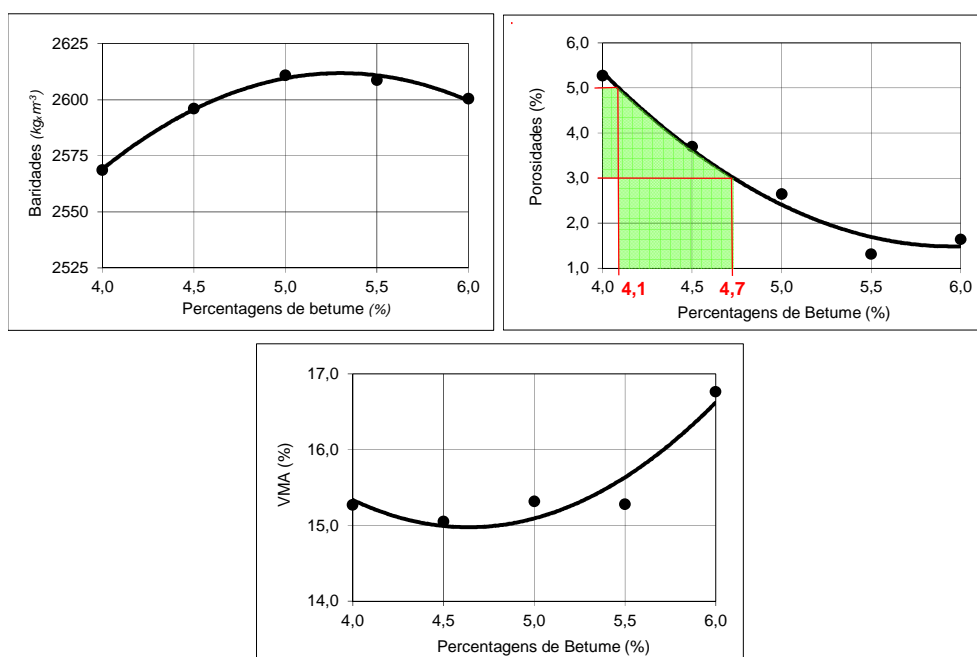


Figura 35 – Resultados gráficos dos ensaios efetuados às lajetas (405×305×63)mm

Depois desta caracterização realizada com as lajetas moldadas com o compactador de rolo, poderemos comparar com os mesmos parâmetros obtidos com os provetes moldados com o compactador de impacto Marshall (Figura 36)

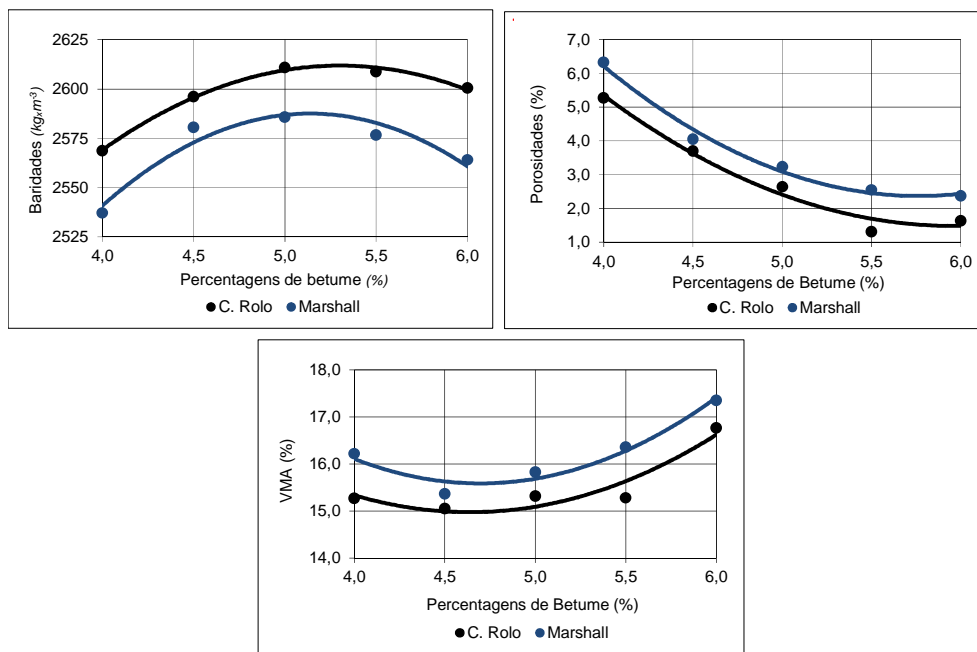


Figura 36 – Baridades, Porosidade e VMA obtidas por aplicação do método Marshall e do compactador de rolo

Na representação gráfica apresentada observa-se que a variação da baridade verificada entre os dois métodos de compactação implica a variação dos parâmetros caracterizadores das misturas betuminosas – baridade, porosidade e VMA –, uma vez que todos estão relacionados analiticamente. Utilizando o compactador de impacto obtivemos uma baridade mais elevada em média cerca de 1,10% do que o valor da baridade obtida com a aplicação do método de compactação Marshall.

4 ESTUDO EXPERIMENTAL – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Por forma a garantir a satisfação das preocupações relativas ao desempenho das misturas betuminosas, têm vindo a desenvolver-se técnicas e ensaios laboratoriais, com maior ou menor complexidade, para a caracterização do seu comportamento mecânico, nomeadamente no que concerne ao comportamento à deformação permanente daqueles materiais.

Os ensaios realizados em laboratório, para caracterização do comportamento mecânico de misturas betuminosas devem ser efetuados sob condições devidamente controladas, por forma a fornecer os elementos relativos ao seu comportamento, após fabrico e aplicação em obra e quando sujeitas quer às ações do tráfego, quer climáticas (Freire., 2000)

De acordo com a EN 12697-22, o equipamento utilizado é constituído por uma roda, sobre a qual atua uma carga bem definida. A roda move-se a uma velocidade controlada sobre uma amostra num movimento de vaivém, fazendo um percurso de 20000 passagens. Neste movimento é formado um sulco sobre a superfície do provete, geralmente designado por rodeira.

Os ensaios podem ser realizados sobre provetes fabricados em laboratório ou colhidos de um pavimento e são aplicáveis às misturas betuminosas cuja dimensão máxima granulométrica seja igual ou inferior a 32 mm.

Os provetes moldados em laboratório devem ser compactados segundo a EN 12697-33, utilizando o compactador de rolo. Depois de moldados os provetes poderão ser rejeitados se as suas dimensões não estiverem de acordo com os limites impostos pela EN 12697-22.

No presente estudo, por cada uma das percentagens de betume e por cada baridade média das lajetas com as dimensões de 405×305×63mm (Figura 30), foram moldadas duas lajetas com as dimensões de 305×305×50mm que posteriormente foram ensaiadas para determinação da resistência à deformação permanente (WTT).

Os provetes a ensaiar são fixos num molde, alinhados com a extremidade superior do molde, sendo ensaiados em ambiente fechado à temperatura controlada de 60°C.

4.2 ENSAIO DE WHEEL TRACKING (WTT)

O ensaio de *Wheel Tracking* (WTT) destina-se à avaliação da resistência à deformação permanente (Quaresma et al., 2000) através da medição do cavado de rodeira apresentado por uma lajeta de mistura betuminosa sujeita às condições de ensaio preconizadas na norma de ensaio aplicável (EN 12697-22).

Na Figura 37 apresenta-se o aspeto quer do equipamento de ensaio quer da uma lajeta para ensaio.



1 – Equipamento WTT 2 – Camara de ensaio 3 – Provete ensaiado
4 – Aquisição de dados

Figura 37 – Ensaio de resistência à deformação permanente (WTT)

Poderão ser utilizados três tipos de dispositivos de ensaio em conformidade com a norma em vigor; de pequenas, grandes e muito grandes dimensões. No caso deste trabalho, foi utilizado o equipamento de pequenas dimensões (Figura 37).

Com o registo automático e informático da aquisição de dados obtêm-se os valores da profundidade média de cavado de rodeira PRD_{air} , e a unidade da taxa de deformação média WTS_{air} , apresentando-se no Quadro 13 os resultados obtidos, sobre provetes testados a um determinado número de ciclos em ambiente de ar, permitindo uma registo gráfico de fácil leitura e simples interpretação (Figura 38).

Quadro 13 – Resultados dos ensaios de WTT

% Betume	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
PRD_{air} (%)	9,6	13,7	19,2	28,4	34,7
WTS_{air} ($mm \times 10^{-3}$ ciclos)	0,13	0,27	0,36	0,55	0,6

Atendendo à evolução desordenada e desigualdade da deformação respeitante à percentagem de betume de 6,0%, (Figura 39), não se consideraram seus valores nos gráficos de registo da evolução do PRD_{air} e WTS_{air} . É provável que tal desordenamento e desigualdade se devam à percentagem elevada de betume adicionada.

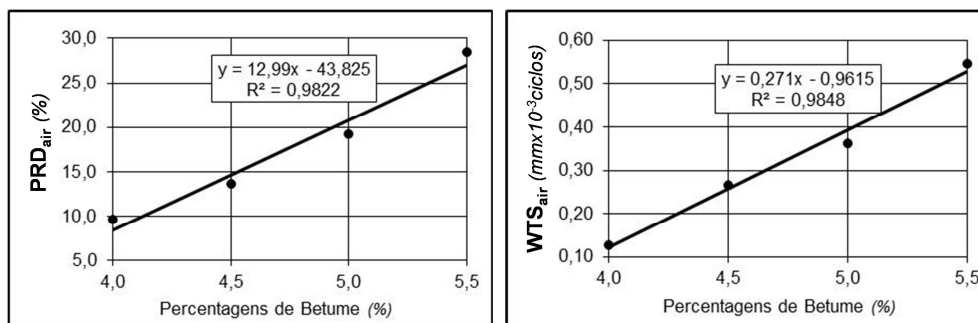


Figura 38 – Registo da evolução do PRD_{air} e WTS_{air}

Os registos gráficos da Figura 38 ilustram a evolução da profundidade média de rodeira PRD_{air} e a variação da taxa de deformação média WTS_{air} , verificando-se o crescimento em valor absoluto de ambos os parâmetros função do aumento da percentagem de betume adicionada.

Os gráficos da Figura 39 mostram a evolução da deformação individual de cada provete (PDR_{air}) e verifica-se que o aumento da deformação é proporcional ao aumento do valor da percentagem do betume.

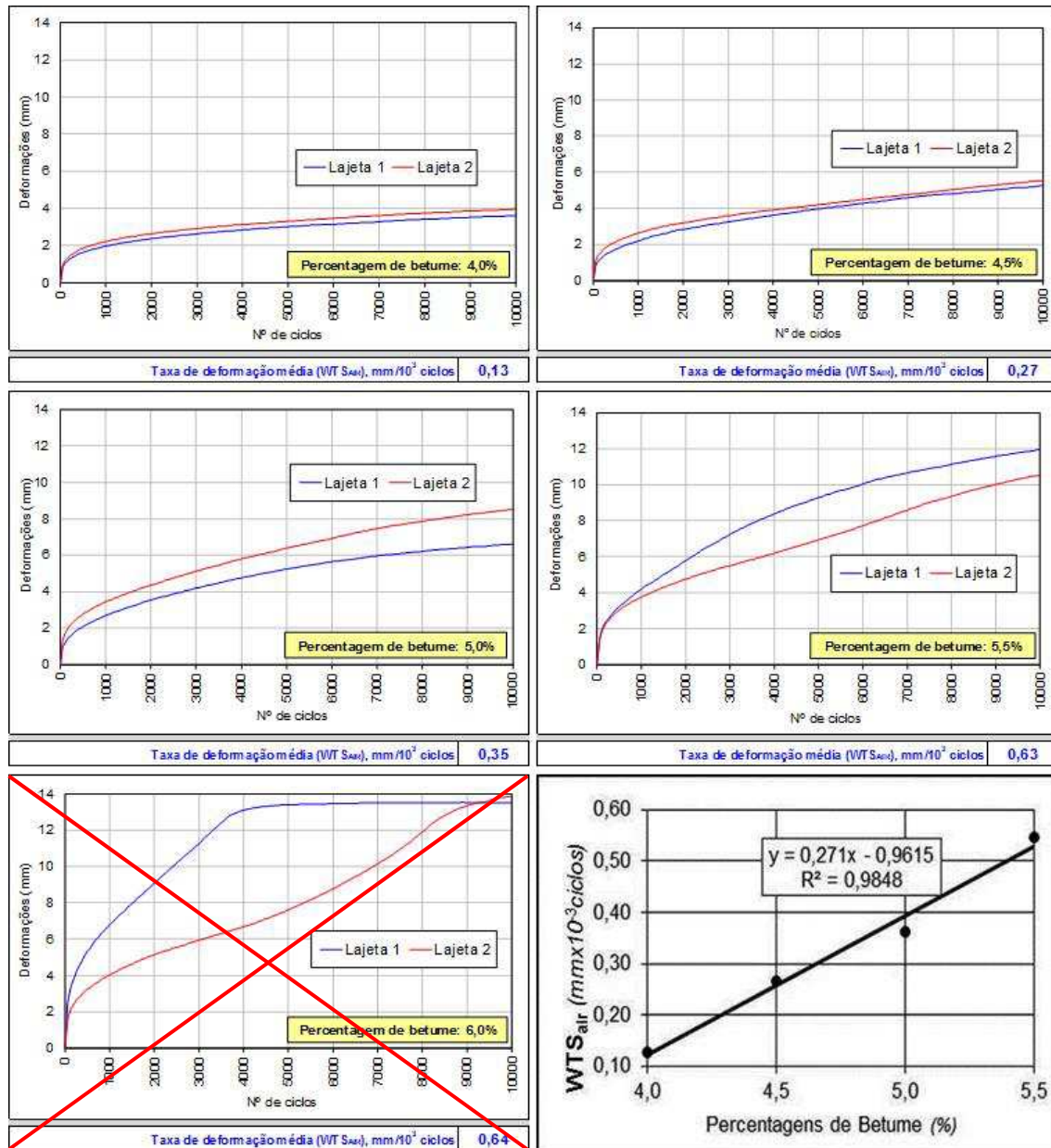


Figura 39 – Características gráficas dos ensaios WTT

4.3 MÓDULO DE RIGIDEZ

As leis de comportamento à fadiga das misturas betuminosas são expressas, geralmente, por relações entre as tensões e/ou extensões de tração e o número admissível de passagens de um determinado eixo que induz os valores dessas tensões e/ou extensões. Essas relações são geralmente estabelecidas a partir de ensaios laboratoriais de cargas repetidas que são conduzidos a diversos níveis de tensão ou extensão, e devem reproduzir quanto possível as condições de funcionamento dos materiais em serviço (Azevedo, 1993).

Os ensaios são realizados a temperatura controlada em provetes prismáticos, trapezoidais ou cilíndricos, quer fabricados em laboratório, quer extraídos das camadas dos pavimentos. Do ponto de vista da solicitação de ensaio, os provetes podem ser submetidos à flexão simples, à tração indireta em compressão diametral ou à tração direta uniaxial (Palha, 2008).

4.3.1 Determinação efetuada a temperatura constante de 20°C

O método utilizado para a determinação do módulo de rigidez caracteriza o comportamento de misturas betuminosas em flexão (Figura 40), com o provete prismático (405×50×50mm) a ser submetido a flexão periódica nos quatro pontos.

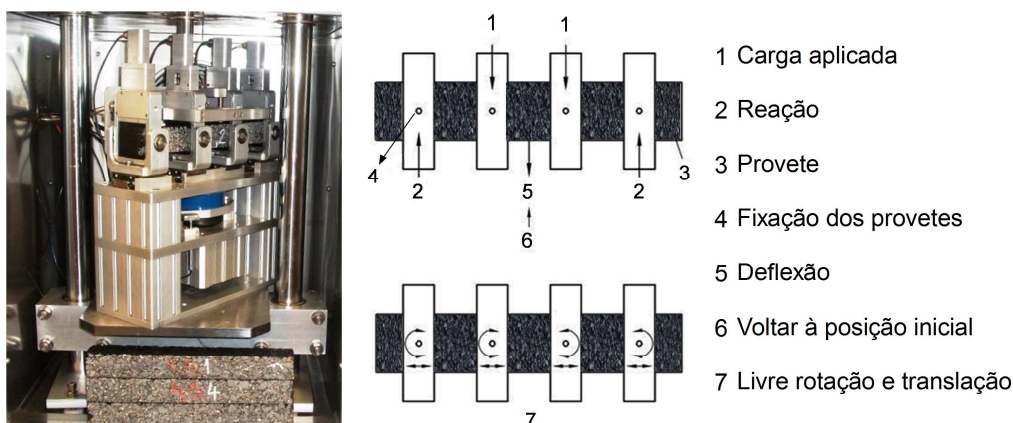


Figura 40 – Equipamento para testar a resistência ao fendilhamento por fadiga

Os testes são realizados em misturas betuminosas compactadas sob uma carga sinusoidal ou outra carga controlada (NP EN 12697 Anexo D), podendo ser utilizados vários tipos de amostras

Os vários elementos do ensaio são acondicionados em atmosfera ventilada e temperatura controlada para cada condição de ensaio a realizar.

O equipamento utilizado tem capacidade para a aplicação de uma carga sinusoidal a uma amostra através de um mecanismo adequado equipado com dois suportes interiores colocados na amostra (Figura 40). Possui um sistema que permite controlar o modo de carga da amostra a fim de cumprir as exigências relativas à execução do ensaio e equipamento eletrónico de registo de dados informaticamente.

No presente estudo, as vigas ensaiadas foram cortadas (Figura 41) de lajetas moldadas em laboratório com o compactador de rolo (Figura 33) e armazenadas em camara seca, sobre superfície plana, a uma temperatura de 20°C até atingirem massa constante. Por cada percentagem de betume obtiveram-se dez vigas, nove para

ensaios para determinação do módulo de rigidez e avaliação do comportamento à fadiga a 10Hz e 20°C e uma viga para ser ensaiada com a mesma frequência, mas às temperaturas de 10°C, 20°C, 30°C e 40°C.



Figura 41 – Conjunto de vigas para ensaios a 10Hz e 20°C

As dimensões das vigas foram avaliadas em quatro pontos e em todas as dimensões e foi efetuada a baridade imersa individual.

As vigas foram instaladas na estrutura de carga e em seguida foram sujeitas a uma carga sinusoidal a uma frequência selecionada e um deslocamento inicial imposto.

A força necessária foi aplicada através da estrutura de carga ligada aos dois suportes interiores (Figura 40) e assegurada pela resposta do deslocamento imposto.

Para verificação do bom funcionamento do equipamento, foi previamente ensaiada uma viga de referência com módulo de rigidez conhecido.

Foram obtidos os espectros de frequência do módulo (de rigidez) inicial complexo à temperatura de ensaio escolhida (20°C). Este pré-ensaio consistiu nas medições de resposta na gama de frequências nominais de 1Hz, 3Hz, 5Hz e 10Hz e posteriormente repetiu-se a 1Hz (Figura 42).

O modo de carga neste pré-ensaio foi a deflexão constante representativa para uma flexão de deformação máxima inferior a 50µm/m e com 200 repetições aplicadas em cada frequência (NP EN 12697 Anexo D).

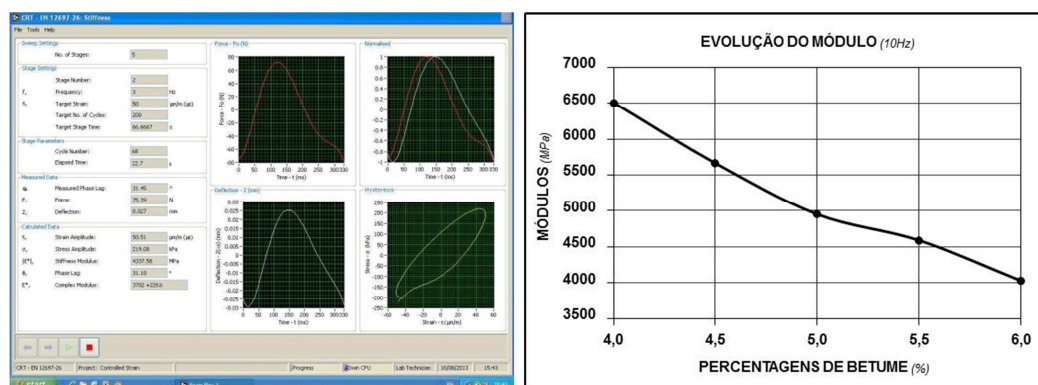


Figura 42 – Módulo de rigidez inicial. Registro do ensaio e resultado tipo

No Quadro 14 apresentam-se os resultados dos valores médios obtidos nos ensaios para determinação do módulo de rigidez inicial (Figura 43).

Quadro 14 – Resultados médios dos ensaios de Módulo de rigidez inicial

PROVETES	MÓDULOS (Mpa)					ÂNGULO DE FASE (°)				
	1 (Hz)i	1 (Hz)f	3 (Hz)	5 (Hz)	10 (Hz)	1 (Hz)i	1 (Hz)f	3 (Hz)	5 (Hz)	10 (Hz)
4,0%	3173	3118	4677	5437	6507	37	36	34	31	25
σ	230	210	297	347	370	2,7	1,1	5,3	4,1	1,2
C_V (%)	7,2	6,7	6,4	6,4	5,7	7,2	3,0	15,4	13,1	4,8
V_{MAX}	3496	3348	5008	5877	6893	40	37	42	38	27
V_{MIN}	2802	2780	4167	4826	6027	32	34	29	27	24
4,5%	2634	2619	3992	4697	5665	40	37	39	35	27
σ	424	366	531	588	645	0,9	0,9	3,9	2,9	1,7
C_V (%)	16,1	14,0	13,3	12,5	11,4	2,3	2,5	10,0	8,4	6,3
V_{MAX}	2914	2828	4267	5032	6099	42	39	42	38	29
V_{MIN}	2590	2619	3992	4697	5648	39	36	33	30	25
5,0%	2156	2158	3375	4031	4954	44	40	45	42	28
σ	96	114	197	228	237	1,5	1,0	2,9	1,7	1,5
C_V (%)	4,5	5,3	5,8	5,6	4,8	3,4	2,6	6,4	4,0	5,4
V_{MAX}	2306	2318	3648	4348	5348	46	42	47	44	30
V_{MIN}	2043	1999	3040	3599	4492	41	39	38	38	25
5,5%	1987	1968	3116	3749	4592	44	40	45	41	29
σ	107	88	164	170	170	2,8	1,2	5,1	4,2	1,2
C_V (%)	5,4	4,4	5,3	4,5	3,7	6,5	3,1	11,4	10,1	4,0
V_{MAX}	2177	2121	3380	4011	4902	46	42	48	45	31
V_{MIN}	1824	1792	2868	3452	4282	37	38	31	31	27
6,0%	1843	1810	2812	3335	4032	41	37	41	38	27
σ	144	142	158	149	174	3,3	2,8	5,1	5,0	2,9
C_V (%)	7,8	7,8	5,6	4,5	4,3	8,2	7,5	12,2	13,4	10,9
V_{MAX}	2094	2052	3084	3560	4279	45	40	47	43	30
V_{MIN}	1662	1622	2582	3111	3778	37	34	31	28	22

σ (Desvio padrão); C_V (Coeficiente de variação)

V_{MAX} (Valor máximo); V_{MIN} (valor mínimo)

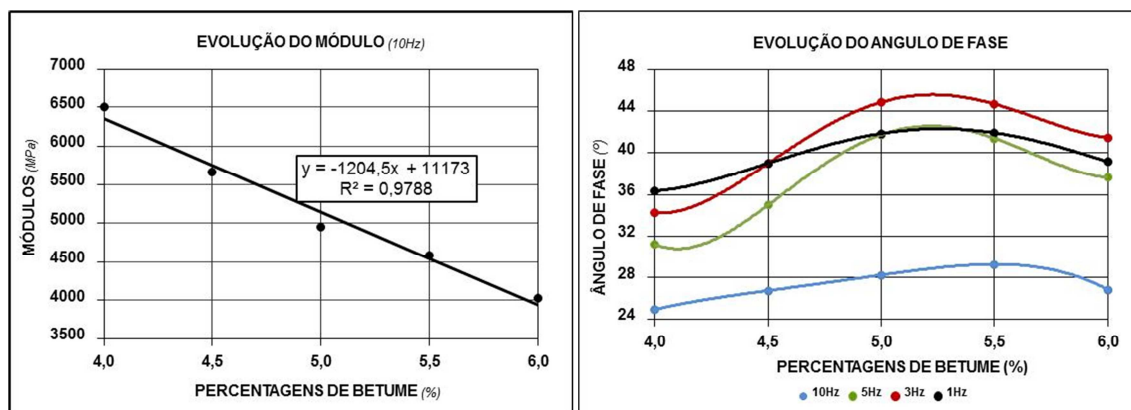


Figura 43 – Características gráficas do Módulo de rigidez e Ângulo de fase

Através dos gráficos anteriores, observa-se a redução do valor do módulo de rigidez com o aumento da percentagem de betume e o aumento do ângulo de fase até aos 5,5% de betume, seguindo-se a sua descida a partir dessa percentagem. Este andamento do ângulo de fase verifica-se em todas as frequências ensaiadas (1Hz; 3Hz; 5Hz e 10Hz) no entanto, os valores crescem da frequência de 1Hz para os 3Hz e a partir daí decrescem até aos 10Hz.

4.3.2 Determinação efetuada com variação de temperatura; 10°C, 20°C, 30°C e 40°C

Sobre a viga remanescente (10ª viga) obtida em cada uma das percentagens de betume, foram efetuados ensaios de módulo de rigidez, cujo resumo dos resultados obtidos se apresentam no Quadro 15 e os gráficos respetivos constam da Figura 44.

Quadro 15 – Variação do Módulo e Ângulo de fase com a temperatura

PROVETE	Temperatura	MÓDULOS (Mpa)					ÂNGULO DE FASE (°C)				
		1(Hz) <i>i</i>	1(Hz) <i>f</i>	3(Hz)	5(Hz)	10(Hz)	1(Hz) <i>i</i>	1(Hz) <i>f</i>	3(Hz)	5(Hz)	10(Hz)
4,0%	10°C	9032	9240	11457	12330	13481	17	19	15	13	11
	20°C	3831	3676	5237	6042	7148	29	32	25	25	24
	30°C	1396	1302	2133	2564	3298	39	39	36	36	35
	40°C	471	440	707	867	1181	38	37	40	41	42
4,5%	10°C	9257	8788	11036	10319	13232	20	20	19	22	19
	20°C	4690	4176	6967	6573	9372	35	38	28	23	31
	30°C	1128	1084	1782	2183	2877	42	41	39	39	37
	40°C	345	320	513	624	847	38	36	39	41	42
5,0%	10°C	6403	6366	8240	9258	10500	22	23	18	18	16
	20°C	2097	2080	3186	3815	4762	37	38	32	31	29
	30°C	703	680	1131	1403	1894	42	41	41	41	40
	40°C	235	222	350	430	591	36	36	39	42	43
5,5%	10°C	6760	6638	8643	9586	10887	22	21	18	18	15
	20°C	2101	2128	3232	3846	4803	37	38	30	29	29
	30°C	710	712	1147	1438	1940	47	44	44	43	41
	40°C	229	226	346	427	583	37	37	40	41	42
6,0%	10°C	7721	7642	9479	10387	11474	18	18	15	15	13
	20°C	2844	2819	4019	4643	5529	31	32	26	25	25
	30°C	1018	1024	1595	1936	2497	40	39	37	36	35
	40°C	319	312	498	612	819	38	37	39	40	40

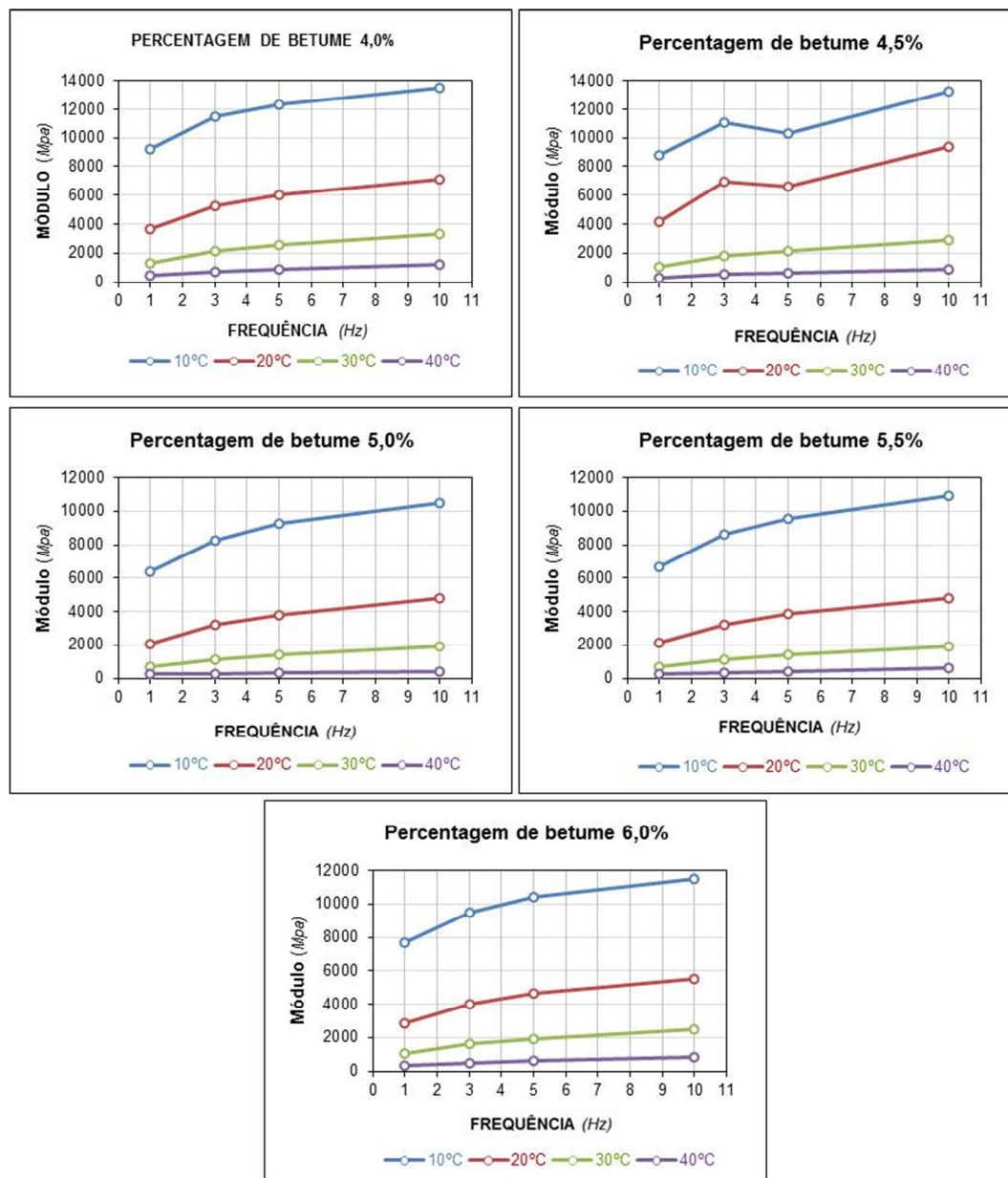


Figura 44 – Evolução do valor do módulo com o aumento da temperatura e frequência

A amostragem neste tipo de ensaio foi mínima, mas os resultados ilustram com alguma clareza as variações do módulo de rigidez com a frequência e com a temperatura de ensaio.

Salvo uma pequena exceção na percentagem de 4,5% de betume e na frequência de 5Hz, os gráficos apresentam o aumento do valor do módulo de rigidez com o aumento da frequência e o decréscimo daquele parâmetro com o aumento da temperatura, sendo que este tipo de comportamento decorre das características do ligante betuminoso (Picado Santos, 1994).

4.4 RESISTÊNCIA AO FENDILHAMENTO POR FADIGA

A resistência ao fendilhamento por fadiga é uma característica que permite caracterizar as misturas betuminosas com base no seu desempenho, permitindo estimar o seu comportamento estrutural de acordo com as especificações definidas para misturas betuminosas.

O método de ensaio utilizado caracteriza o comportamento de misturas betuminosas com a aplicação de cargas repetidas em flexão de quatro pontos simetricamente colocados com o provete prismático (405×50×50mm), de forma idêntica à dos ensaios de rigidez.

No presente estudo, as vigas ensaiadas foram cortadas de lajetas moldadas em laboratório no compactador de rolo e armazenadas em camara seca, sobre superfície plana, a uma temperatura de 20°C até atingirem massa constante. Por cada percentagem de betume obtiveram-se nove vigas para a realização de ensaios de fadiga a 10Hz e a 20°C.

As vigas foram instaladas na estrutura de carga sendo em seguida movidas sinusoidalmente a uma frequência escolhida e um deslocamento inicial imposto.

A força necessária foi aplicada através da estrutura de carga ligada aos dois suportes interiores e assegurada pela resposta do deslocamento imposto.

Nos ensaios de fadiga (Figura 45), o valor inicial do módulo calculado foi estimado a partir dos valores medidos para a força, para o deslocamento e para o atraso de fase após o centésimo ciclo. O ensaio de fadiga prossegue até que o módulo calculado desça para metade do seu valor inicial ou até a viga se partir.

O valor inicial do módulo calculado foi estimado a partir dos valores medidos para a força, para o deslocamento e para o atraso de fase após o centésimo ciclo (n = 100).

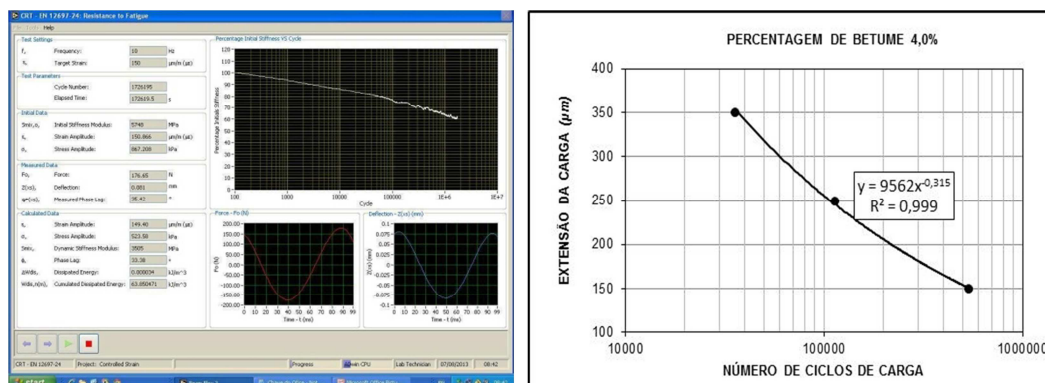


Figura 45 – Fadiga. Registo do ensaio e resultado tipo

Os ensaios de fadiga foram efetuados com três níveis de extensão (Quadro 16), tendo sido ensaiadas 3 vigas por cada nível e por cada percentagem de betume utilizada, totalizando 45 vigas.

Quadro 16 – Resumo dos resultados obtidos com os ensaios de fadiga

Betume	Extensão (μmm)	Número de ciclos	Betume	Extensão (μmm)	Número de ciclos
4,0%	150	534634	5,0%	200	1020201
	250	113227		300	252358
	350	35874		400	79393
4,5%	200	397815	5,5%	300	563905
	300	92299		400	126841
	400	24035		500	33486
			6,0%	300	829190
				400	166783
				500	50543

Os valores das extensões e o número de repetições por cada nível foram escolhidos em função do tempo útil disponível para a execução do trabalho e em função do grau de especificidade desejado. Em todas as extensões os períodos de fadiga situaram-se entre os 10^4 e os 2×10^6 ciclos (Figura 46).

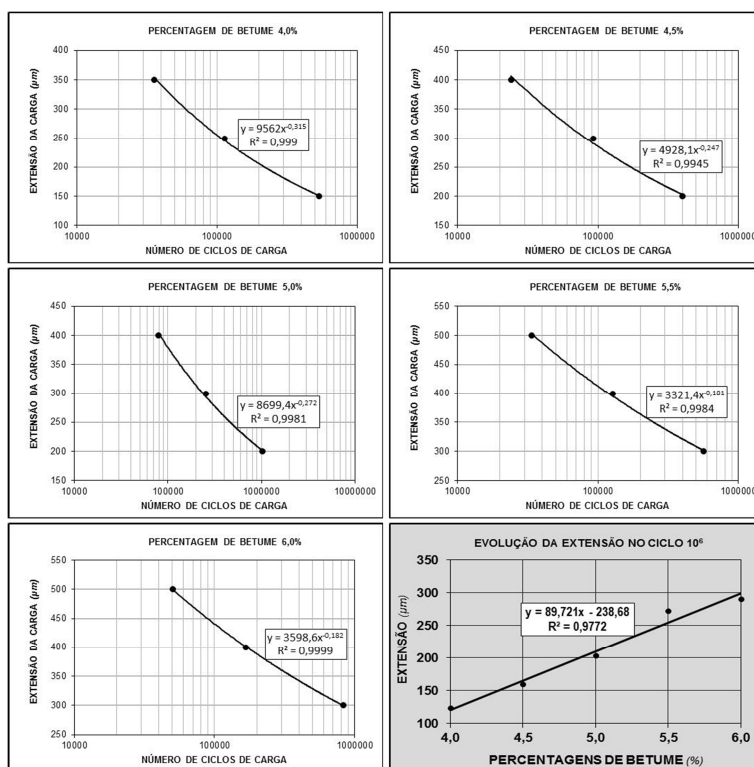


Figura 46 – Resultados gráficos dos ensaios de fadiga

Os cinco primeiros gráficos apresentados são os resultantes dos ensaios realizados e o sexto gráfico (sombreado) mostra a evolução da extensão ao ciclo em que n é igual a 10^6 .

4.5 MÓDULO DE RIGIDEZ POR TRAÇÃO INDIRETA

Os ensaios para determinação do módulo de rigidez em provetes cilíndricos por tração indireta foram realizados de acordo com a EN 12697-26 e a Figura 47 ilustra um equipamento tipo para colocação do provete de ensaio.

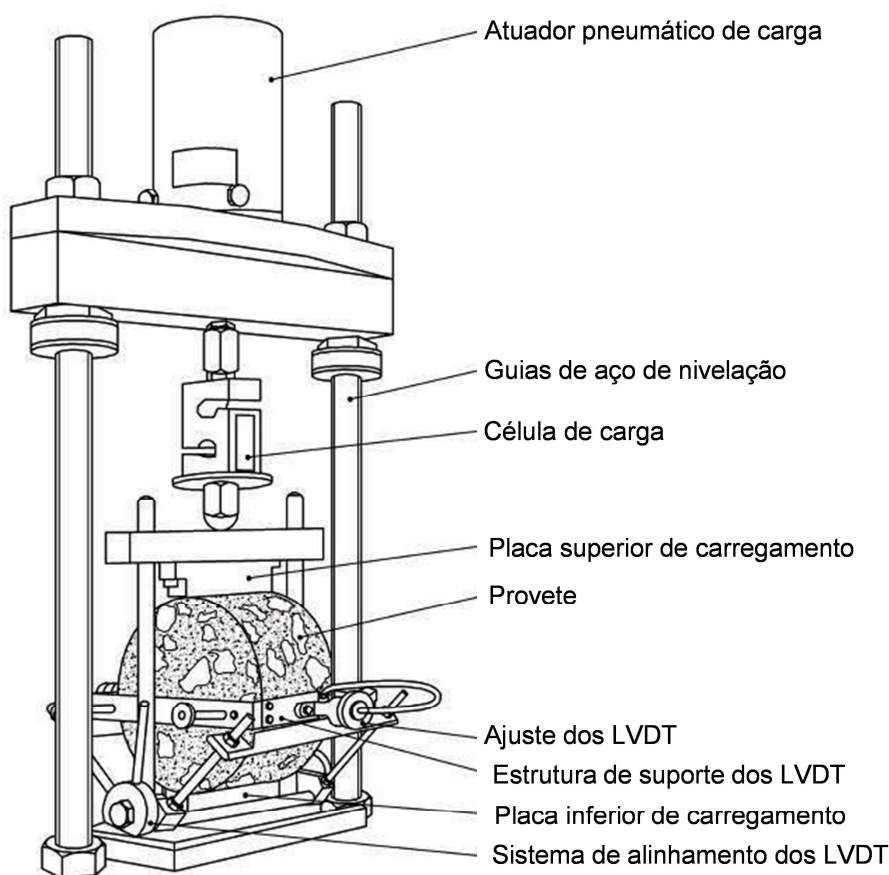


Figura 47 – Equipamento tipo de ensaio e suporte de provetes

O atuador pneumático de carga deve ser capaz de aplicar impulsos repetidos de carga com período de descanso (Figura 48), tendo a capacidade de controlar não só o pico de carga como a velocidade de aplicação da mesma e o tempo de repouso.

Os ensaios de tração indireta utilizam provetes cilíndricos moldados em laboratório, tarolos extraídos por carotagem do pavimento ou de lajetas moldadas em laboratório. Os provetes são submetidos a um carregamento repetido de compressão diametral, que desenvolve um estado de tensão horizontal de tração uniforme ao longo do plano diametral de aplicação da carga.

Neste estudo, foram realizados ensaios em provetes moldados com o compactador de impacto Marshall, em carotes retiradas das lajetas moldadas com o compactador de rolo e em carotes colhidas em obra (Figura 49) de modo a ser possível efetuar uma análise comparativa do seu comportamento, função do tipo de compactação. Todas as amostras tinham a mesma composição dos vários materiais constituintes.

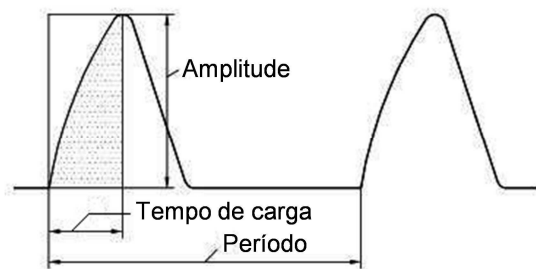


Figura 48 – Tipo de carregamento aplicado

Segundo os dados fornecidos em obra, a mistura betuminosa do tipo AC 14 surf 35/50 aplicada apresentava uma percentagem de 5,0% de betume.



Figura 49 – Amostras ensaiadas por diferentes processos de fabrico

Previamente à realização do ensaio foi determinada a altura média dos provetes (Quadro 17) e os ensaios foram realizados às temperaturas de 10°C, 20°C, 30°C e 40°C sendo feita a aquisição de dados em registo automático (Figura 50).



Figura 50 – Equipamento de ensaio e sistema de aquisição de dados

O equipamento ilustrado na Figura 50 permite visualizar as diversas curvas tipo (Figura 51) da força e da deformação durante o decorrer do ensaio.

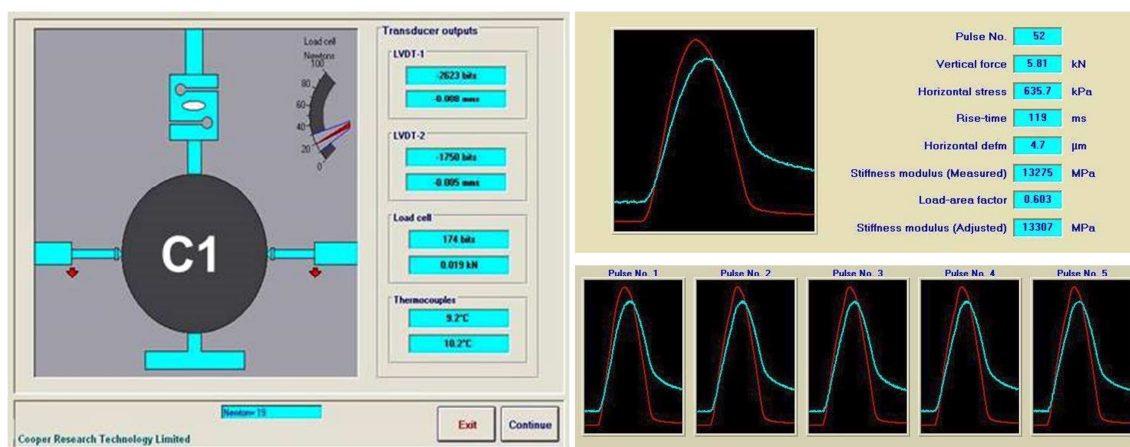


Figura 51 – Esquema do princípio de ensaio e curvas tipo da força e deformação

Foram compilados os resultados e apresentam-se os valores obtidos nos ensaios de módulo de deformabilidade em provetes cilíndricos por tração indireta (Quadro 17).

Com os valores médios dos módulos aos 10°C, 20°C, 30°C e 40°C e por cada tipo de amostras ensaiadas, obteve-se o gráfico de correlação entre as várias formas de compactação de misturas betuminosas (Figura 52).

Quadro 17 – Valores relativos a cada um dos provetes ensaiados

Provete cilindrico	Baridade (kg.m^{-3})	Massa (g)	Ø (mm)	Espessura (mm)	Módulo (Mpa)				
					10°C	20°C	30°C	40°C	
Marshall	21	2600	1174,6	101,78	57,15	16422	9423	4131	1632
	22	2603	1179,5	101,62	56,98	15434	8616	4001	1314
	23	2601	1187,3	101,79	57,54	14596	9757	3577	1445
	24	2602	1199,7	101,75	58,29	15918	9687	4750	1901
C. de rolo	C1	2646	1248,7	101,56	59,42	7554	3671	2783	860
	C2	2636	1316,6	101,19	63,72	9247	4816	2465	1122
	C3	2643	1265,0	101,59	60,74	8921	4265	1769	934
	C4	2648	1254,3	101,45	57,08	7940	4000	1745	804
Campo	1	2499	1003,5	92,83	57,10	7340	3372	2292	851
	2	2521	1002,2	92,63	56,60	8671	4218	2296	940
	3	2491	1012,4	92,70	53,58	7405	3505	1960	1062
	4	2497	971,0	92,66	53,84	8455	4480	2390	1239
Médias dos valores do Módulo de Rigidez (Mpa)					Marshall	2601,5	1185,3	101,74	57,49
					C. Rolo	2642,9	1271,2	101,45	60,24
					C. Obra	2502,0	997,3	92,70	55,28

O gráfico que se apresenta (Figura 52), relaciona os valores obtidos nos ensaios efetuados em provetes de uma mistura betuminosa AC 14 surf 35/50 compactada com três tipos de compactação diferentes. Compactação com o compactador de impacto segundo o procedimento Marshall (NP EN 12697-34), com o compactador de rolo (NP EN 12697-33) e a compactação efetuada em obra.

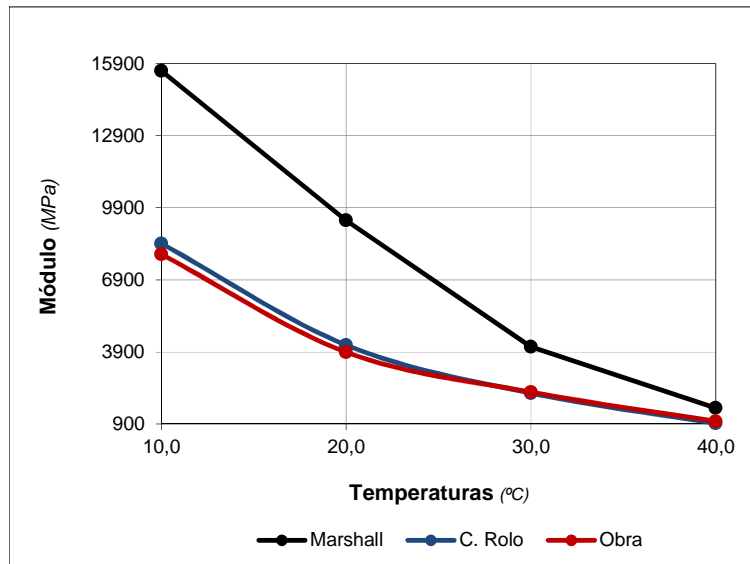


Figura 52 – Valores do módulo de rigidez obtidos sobre provetes compactados pelos três métodos de compactação

Como se pode observar, os tipos de compactação de obra e do compactador de rolo apresentam valores de módulo na mesma ordem de grandeza, enquanto os provetes moldados com o compactador de impacto duplicam o valor de módulo em quase todas as temperaturas de ensaio. Anota-se que para a temperatura de 40°C os valores dos módulos de rigidez obtidos para os diferentes tipos de provetes apresentam a menor diferença.

4.6 RESISTÊNCIA CONSERVADA

A resistência conservada de uma mistura betuminosa é baseada comparação entre forças de rotura Marshall (Norma militar Americana MIL-STD – 620A) de dois grupos de quatro provetes, com médias de baridades idênticas, previamente acondicionados em condições diferentes (APORBET, 1998). A relação entre as forças de rotura médias dos dois grupos de provetes determina o índice de Resistência Conservada. O procedimento de realização do ensaio tem a seguinte sequência:

1. Fabrico de 8 provetes com diâmetro de $101,6 \pm 0,1$ mm e 63,5 mm de altura
2. Determinação da baridade imersa dos provetes (Figura 24)
3. Divisão em dois grupos de provetes de modo a que a baridade média dos grupos seja idêntica
4. Determinar a força de rotura Marshall (Figura 26) nas seguintes condições:
 - a) Sobre os quatro provetes do 1º grupo após 40 minutos de imersão em banho de água a $60 \pm 1^\circ\text{C}$. Registrar a força média F_1
 - b) Sobre os quatro provetes do 2º grupo após 24 horas de imersão em banho de água a $60 \pm 1^\circ\text{C}$. Registrar a força média F_2
5. O valor do Índice da Resistência conservada (IRC) é caracterizado pela relação: $\frac{F_2}{F_1} \times 100 (\%)$

4.6.1 Provetes moldados com o compactador de impacto

O valor obtido do Índice de resistência conservada (IRC) foi de 85% cujos valores resumo se apresentam no Quadro 18

Quadro 18 – Resumo dos valores obtidos no ensaio de resistência conservada

Norma militar Americana MIL-STD - 620A (<i>Provetes moldados Marshall</i>)							
Proвете	Baridade imersa (kg.m^{-3})	Absorção de água (%)	Volume (ml)	Factor correção da força de rotura	Força de rotura (N)	Força corrigida (N)	Deformação (mm)
21	2600	0,1	452,3	1,2325553	13,0	16,0	4,38
22	2603	0,1	453,3	1,2286174	14,3	17,6	4,53
25	2603	0,1	453,9	1,2259469	14,0	17,2	4,08
26	2608	0,1	458,5	1,2081877	13,8	16,6	5,33
23	2595	0,0	458,1	1,2096578	11,6	14,0	4,36
24	2602	0,0	461,7	1,1958790	12,1	14,5	4,76
27	2601	0,1	453,6	1,2273207	11,7	14,3	5,37
28	2617	0,0	453,6	1,2273207	11,8	14,4	4,95

Foram moldados 8 provetes destinados a ensaios de caracterização mecânica do Índice de Resistência Conservada (IRC). A fórmula de trabalho utilizada foi a obtida neste trabalho através do estudo Marshall.

Os valores médios das baridades, forças de rotura e deformação Marshall foram os seguintes:

- $\gamma_{bf} = 2604 \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$ $\gamma_{bf} = 2608 \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$
- $F_1 = 16,83 \text{ kN}$ $D_1 = 4,58 \text{ mm}$
- $F_2 = 14,30 \text{ kN} \dots \dots \dots D_2 = 4,86 \text{ mm}$

O valor do Índice de Resistência Conservada foi de: IRC = 85%

4.6.2 Carotes extraídas das lajetas moldadas com o compactador de rolo

Os provetes a ensaiar foram caroteados de lajetas (Figura 34), moldadas com o compactador de rolo e com a fórmula de trabalho obtida no estudo de formulação Marshall efetuado neste trabalho.

O valor obtido do Índice da Resistência Conservada (IRC) foi de 101% cujos valores resumo se apresentam no Quadro 19

Quadro 19 – Resumo dos valores obtidos no ensaio de resistência Conservada

Norma militar Americana MIL-STD - 620A (<i>Provetes caroteados de lajetas do RC</i>)							
Proвете	Baridade imersa ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Absorção de água (%)	Volume (ml)	Factor correção da força de rotura	Força de rotura (N)	Força corrigida (N)	Deformação (mm)
C1	2646	0,1	471,8	1,1579943	12,060	14,0	8,06
C3	2643	0,1	478,5	1,1334312	14,853	16,8	8,29
C5	2643	0,1	471,2	1,1601456	13,672	15,9	8,99
C6	2639	0,1	477,8	1,1360093	13,561	15,4	8,78
C2	2629	0,1	500,5	1,0561112	13,765	14,5	7,91
C4	2653	0,1	472,5	1,1552185	13,759	15,9	8,83
C7	2630	0,1	469,4	1,1666606	13,948	16,3	8,27
C8	2652	0,1	474,2	1,1490247	13,691	15,7	8,24

Os valores médios das forças de rotura e deformação Marshall foram os seguintes:

- $\gamma_{bf} = 2642 \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$ $\gamma_{bf} = 2641 \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$
- $F_1 = 15,52 \text{ kN}$ $D_1 = 8,53 \text{ mm}$
- $F_2 = 15,61 \text{ kN} \dots \dots \dots D_2 = 8,31 \text{ mm}$

O valor do Índice de Resistência Conservada foi de: IRC = 101%

4.7 SENSIBILIDADE À ÁGUA

O método de avaliação da sensibilidade à água (TRB, 2011) de misturas betuminosas está padronizado na EN 12697-12 e a sua avaliação obtém-se medindo a resistência mecânica à tração indireta, de acordo com a norma europeia EN 12697-23, sobre dois grupos de provetes acondicionados em condições distintas. O quociente

entre a resistência à tração indireta média dos provetes condicionados (ITS_w) e a resistência à tração indireta média dos provetes sem condicionamento (ITS_d), fornece uma resistência conservada em tração indireta ($ITSR$), que se utiliza como indicador da sensibilidade à água.

O método para a determinação da sensibilidade à água ($ITSR$) em misturas betuminosas é efetuado segundo o seguinte procedimento:

- 1 Fabrico mínimo de 6 provetes cilíndricos moldados segundo a EN 12697-30 desde que a dimensão máxima do agregado da mistura $\leq 22\text{mm}$.
- 2 Determinação da baridade imersa dos provetes (Figura 24)
- 3 Divisão em dois grupos de provetes de modo a que a baridade média dos grupos seja idêntica
- 4 O grupo 1 é acondicionado ao ar, em ambiente de $20\pm 5^\circ\text{C}$ e designa-se por grupo seco (ITS_d)
- 5 O grupo 2 designado por grupo imerso (ITS_w) e é sujeito às seguintes condições de ensaio:
 - c) Os três provetes são medidos segundo seu diâmetro e espessura para cálculo do seu volume
 - d) São imersos em água destilada a 20°C , com pelo menos 20mm acima do seu topo e sujeitos a vácuo à pressão de $67\pm 3\text{mb}$ durante $30\pm 5\text{min}$. O tempo necessário para atingir esta pressão deverá demorar $10\pm 1\text{min}$. O processo inverso deverá ser ter igual procedimento até se atingir a pressão atmosférica. Os provetes permanecerão em água durante $30\pm 5\text{min}$ após o vácuo
 - e) Retiram-se da água e são novamente medidos como em (c) e nas mesmas posições para cálculo da variação de volume
 - f) São colocados em água a $40\pm 1^\circ\text{C}$ por um período de 68 a 72h
 - g) Sobre os quatro provetes do 2º grupo após 24 horas de imersão em banho de água a $60\pm 1^\circ\text{C}$. Registrar a força F_1
- 6 Após conclusão do condicionamento dos provetes, os dois grupos são sujeitos ao ensaio para determinação da resistência à de tração indireta a uma temperatura de ensaio de 15°C . O grupo 1 em ambiente seco e o grupo 2 em água

7 O valor da resistência à tração indireta (ITSR) é caracterizado pela

$$\text{relação: } \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100 (\%)$$

4.7.1 Provetes moldados com o compactador de impacto

Com a fórmula de trabalho obtida neste trabalho através do estudo Marshall, foram moldados 6 provetes destinados a ensaios de caracterização mecânica do valor da resistência à tração indireta (ITSR). O valor obtido da resistência à tração indireta (ITSR) foi de 84% cujos valores resumo se apresentam no Quadro 20

Quadro 20 – Resumo dos valores obtidos no ensaio Sensibilidade à água (Marshall)

EN12697-12: Método A - Resistência à tracção indirecta (Provetes Marshall)									
Grupos	Provetes "a seco"			Provetes "imersos"					
Identificação	30	32	33	29	31	34	29	31	34
Antes do vácuo						Depois do vácuo			
Diâmetros - Di (0,01 mm)	101,68	101,68	101,83	101,70	101,68	101,80	101,68	101,78	101,67
	101,46	101,72	101,68	101,75	101,76	101,57	101,67	101,70	101,65
	101,67	101,73	101,75	101,67	101,77	101,76	101,80	101,81	101,76
Diâmetro médio - D (0,01 mm)	101,71	101,71	101,75	101,71	101,74	101,71	101,72	101,76	101,69
Alturas - Hi (0,01 mm)	56,71	57,18	57,75	58,25	55,99	57,67	58,34	56,01	57,53
	57,08	57,55	58,04	58,34	56,41	57,81	58,68	55,78	57,59
	56,78	57,39	58,06	58,27	56,01	57,76	58,42	55,39	57,51
Altura média - H (0,01 mm)	57,37	57,37	57,95	57,39	57,45	57,32	57,25	56,64	57,54
Volumes - Vi (cm³)	466,2	466,2	471,2	466,3	467,1	465,7	465,2	460,6	467,4
Baridades (kg/m3)	2600	2594	2602	2598	2603	2592			
Baridade média (kg/m3)	2599			2598					
Diferença de volume (%)							-0,22	-1,37	0,36
Resistências máximas - P (kN)	20,701	20,914	21,977				18,396	16,727	18,000
Tensões indirecta - ITS (GPa)	0,0023	0,0023	0,0024				0,0020	0,0018	0,0020
Tensão indirecta média (GPa)	0,0023						0,0019		
SENSIBILIDADE À ÁGUA Relação entre grupos - ITSR	84%								

4.7.2 Carotes extraídas das lajetas moldadas com o compactador de rolo

Os provetes a ensaiar foram caroteados de lajetas (Figura 34), moldadas com o compactador de rolo e com a fórmula de trabalho obtida no estudo de formulação Marshall efetuado neste trabalho.

O valor obtido da resistência à tração indireta (ITSR) foi de 84% cujos valores resumo se apresentam no Quadro 18.

Quadro 21 – Resumo dos valores obtidos no ensaio Sensibilidade à água (Carotes)

EN12697-12: Método A - Resistência à tracção indirecta (Carotes)									
Grupos	Provetes "a seco"			Provetes "imersos"					
Identificação	C9	C10	C13	C11	C12	C14	C11	C12	C14
Antes do vácuo						Depois do vácuo			
Diâmetros - Di (0,01 mm)	101,68	101,43	101,46	101,52	101,58	101,55	101,50	101,24	101,43
	101,37	101,56	101,49	101,63	101,40	101,60	101,60	101,48	101,03
	101,70	101,56	101,42	101,46	101,56	101,54	101,44	101,51	101,60
Diâmetro médio - D (0,01 mm)	101,58	101,52	101,46	101,54	101,51	101,56	101,51	101,41	101,35
Alturas - Hi (0,01 mm)	60,77	58,99	61,04	59,58	59,15	59,24	59,53	59,05	59,23
	60,94	59,35	60,45	59,37	59,28	59,26	59,86	59,64	59,74
	60,27	59,20	60,09	59,55	59,66	59,56	59	59,32	59,33
Altura média - H (0,01 mm)	60,66	59,18	60,53	59,41	59,39	59,38	59,41	59,39	59,43
Volumes - Vi (cm³)	491,6	479,0	489,3	481,0	480,7	481,1	480,8	479,7	479,5
Baridades (kg/m3)	2643	2634	2647	2642	2633	2650			
Baridade média (kg/m3)	2641			2642					
Diferença de volume (%)							-0,04	-0,22	-0,33
Resistências máximas - P (kN)	15,004	13,275	13,868						
Tensões indirecta - ITS (GPa)	0,0016	0,0014	0,0014						
Tensão indirecta média (GPa)	0,0015								
SENSIBILIDADE À ÁGUA Relação entre grupos - ITSR	102%								

Salienta-se que, nos ensaios da resistência conservada e da sensibilidade à água, os valores da força de rotura registada nos provetes moldados pelo método Marshall são sempre maiores que os valores de resistência registados pelos provetes moldados com o método de compactação com o compactador de rolo. No entanto, no ensaio da resistência conservada a deformação registada nos provetes Marshall é sensivelmente metade da registada nos provetes moldados com o compactador de rolo.

Estes resultados vão de encontro ao comportamento dos provetes ensaiados para obtenção do módulo de rigidez por tração indireta, onde se obtiveram com os provetes Marshall valores de módulo que duplicavam os valores obtidos com os provetes moldados com o compactador de rolo e os moldados em obra (Figura 52).

4.8 COMPARAÇÃO FOTOGRÁFICA EM CAROTES CORTADAS

Tendo por objetivo comparar visualmente o rearranjo interno das partículas de agregados dos provetes compactados pelos diferentes métodos de compactação adotados no presente estudo, selecionou-se um provete cilíndrico de cada um dos processos de compactação e cortaram-se a meio na vertical segundo a sua espessura (Figura 53).

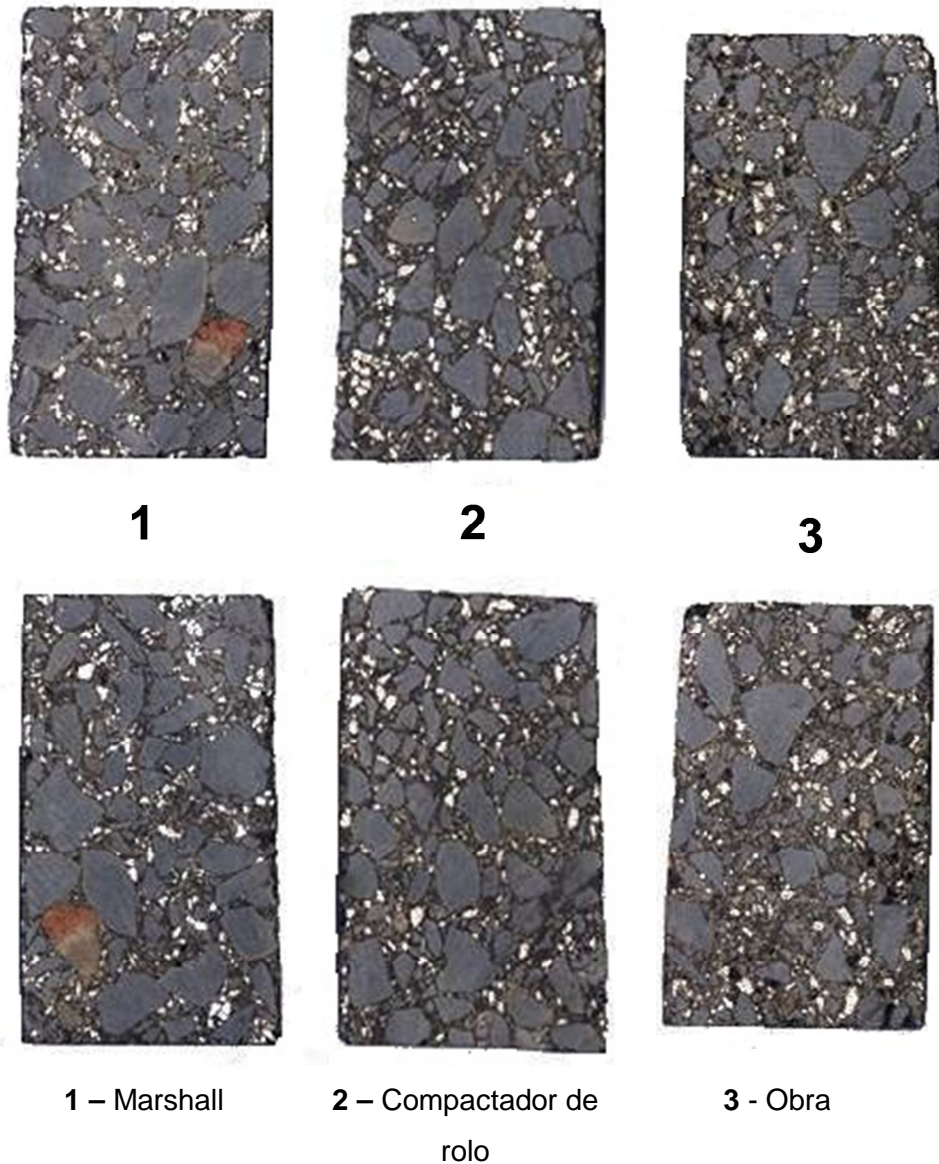


Figura 53 – Corte de provetes cilíndricos

Apesar de serem amostras com pouco representatividade, um tarolo por cada método de compactação, é bem visível a diferença existente no arranjo das partículas de agregados.

Assim as amostras compactadas em obra e com o compactador de rolo apresentam um arranjo das partículas similar, enquanto a amostra compactada com o compactador Marshall é significativamente diferente. Aparentemente a que apresenta uma maior homogeneidade é a compactada com o compactador de rolo.

Os valores de porosidade calculada para os três tipos de misturas betuminosas apresentadas na Figura 53 são de 3,3% para o provete Marshall, 2,5% para o compactado com o compactador de rolo e 6,4% para o provete compactado em obra.

Os provetes Marshall e as carotes extraídas das lajetas moldadas com o compactador de rolo foram compactados com 4,9% de percentagem de betume. As carotes recolhidas em obra, segundo fonte da obra, foram compactadas com 5,0% de percentagem de betume. A composição granulométrica é igual nos três provetes comparados.

4.9 PROPOSTA DUM NOVO ESTUDO DE FORMULAÇÃO

Contrariamente a materiais como o betão, aço e outros, que têm definidos valores característicos e obrigatórios na sua aplicação em obra, como garantia do seu comportamento quando em serviço, às misturas betuminosas não são impostos quaisquer requisitos de funcionalidade, especificados através do seu desempenho.

O Instituto de Estradas de Portugal (IEP), através do caderno de encargos tipo para a rede rodoviária nacional (IEP, 1998), incluía nas suas obrigações um valor máximo para a velocidade de deformação numa mistura betuminosa. Esse valor era caracterizado pela norma Espanhola NLT-173 através do ensaio de pista, e designado como um dos ensaios complementares ao estudo de formulação Marshall.

Segundo a NLT-173, os valores máximos de velocidade de deformação de uma mistura betuminosa no intervalo de 105 min a 120 min ($V_{105-120}$) seriam de 15 ou $20 \times 10^{-3} \text{ mm} \times \text{min}^{-1}$ consoante a zona climática e o tipo de tráfego circulante.

Atualmente o CEEP considera os parâmetros taxa de deformação (WTS_{air}) e profundidade de rodagem máxima (PRD_{air}), definidas na EN 12697-22, como “categoria a declarar”. No entanto, o Anexo A da norma NP EN 13108-1 recomenda que, posteriormente ao estudo de formulação Marshall sejam realizados ensaios de pista (*Wheel-Tracking* - EN 12697-22), não dando contudo qualquer indicação do valor da taxa de deformação máxima desejável.

Na norma NLT-173 a velocidade de deformação é definida pela expressão Na norma NLT-173 a velocidade de deformação é definida pela expressão

$V_{(t_2/t_1)} = \frac{d_2 - d_1}{t_2 - t_1}$ ($\text{mm} \times \text{min}^{-1}$) e na EN 12697-22 a taxa de deformação é definida pela expressão:

$$\text{WTS}_{\text{air}} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} (\text{mm} \times 10^{-3} \text{ ciclos}).$$

Onde:

$V_{(t_1/t_2)}$ ($\text{mm} \times \text{min}^{-1}$) – Velocidade de deformação entre o instante t_1 e t_2 (min)

d_2 (mm) – Deformação da lajeta no instante t_2 (mm)

d_1 (mm) – Deformação da lajeta no instante t_1 (mm)

WTS_{air} ($\text{mm} \times 10^{-3}$ ciclos) – Taxa de deformação média entre os 5000 e os 10000 ciclos

d_{10000} (mm) – Deformação da lajeta no ciclo 10000 (mm)

d_{5000} (mm) – Deformação da lajeta no ciclo 5000 (mm)

Em estudos recentemente realizados (Travé, 2012) são abordadas as duas normas de ensaio para avaliação do comportamento à deformação permanente, sendo equiparados os parâmetros da velocidade de deformação da norma NLT-173 e a taxa de deformação da NP EN 12697-22. Naquele trabalhos foram efetuados ensaios comparativos entre os dois métodos de ensaio, permitindo chegar a uma expressão que converte unidades de velocidade $V_{(t_1/t_2)}$ em unidades de taxa de deformação WTS_{air} , representada pela expressão de modelo linear de ajuste $y=0,067+0,005x$.

A variável dependente y é o valor obtido a partir do ensaio de deformação permanente segundo a NP EN 12697-22 e a variável independente x , é o valor da velocidade de deformação do ensaio de pista NLT -173.

Caso seja utilizado o critério da (IEP, 1998), em que $V_{(115; 120)} = 15$ ou a $20 \times 10^{-3} \text{mm} \times \text{min}^{-1}$ e a fórmula proposta por Travé, 2012, os valores da taxa de deformação (WTS_{air}) a impor no CEEP (CEEP, 2012) seriam de 0,142 ou $0,167 \text{mm} \times 10^{-3}$ ciclos, resultantes das seguintes expressões;

- $X=15 \times 10^{-3} \text{mm} \times \text{min}^{-1} \rightarrow y=0,067+0,005 \times 15 \rightarrow \text{WTS}_{\text{air}} = 0,142 \text{mm} \times 10^{-3}$ ciclos
- $X=20 \times 10^{-3} \text{mm} \times \text{min}^{-1} \rightarrow y=0,067+0,005 \times 20 \rightarrow \text{WTS}_{\text{air}} = 0,167 \text{mm} \times 10^{-3}$ ciclos

Estes valores de WTS_{air} poderão ser transformados em percentagens de betume recorrendo à equação da reta do gráfico da Figura 54, resultante dos resultados obtidos no presente estudo (Quadro 13) com os ensaios de WTT

Assim, as percentagens de betume (P_b) poderão ser obtidas através da expressão:

$$P_b = \frac{WTS_{air} + 0,9615}{0,271}$$

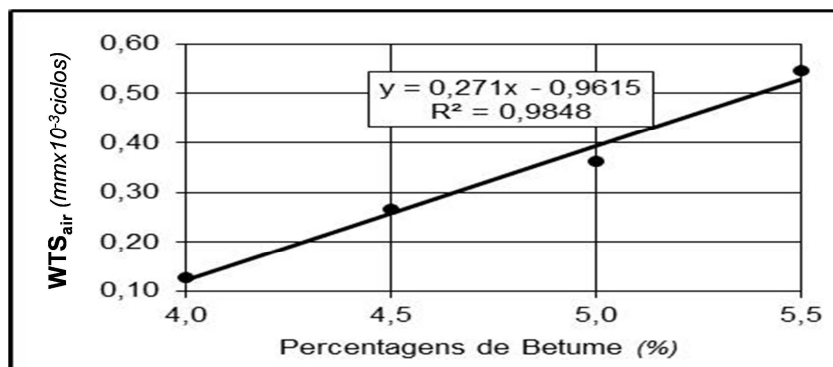


Figura 54 – Gráfico WTS_{air} (Ensaio de WTT)

De acordo com os valores obtidos no estudo desenvolvido e agora apresentado, para WTS_{air} = 0,142mm×10⁻³ ciclos ter-se-ia uma percentagem de betume de 4,1% e a WTS_{air} = 0,167mm×10⁻³ ciclos corresponderia uma percentagem de betume de 4,2%. Como os valores das taxas de deformação são limitativos, os valores de percentagens de betume encontrados e que lhes são correspondentes também o serão. Assim, os valores de 4,1% e 4,2% são valores máximos de percentagem de betume para a imposição da taxa de deformação neste estudo.

A verificação da aceitação ou não dos valores das percentagens de betume calculadas poderá ser efetuada sobre o gráfico das porosidades (Figura 55), onde a zona verde corresponde aos valores limite de porosidade impostos (EP, 2012).

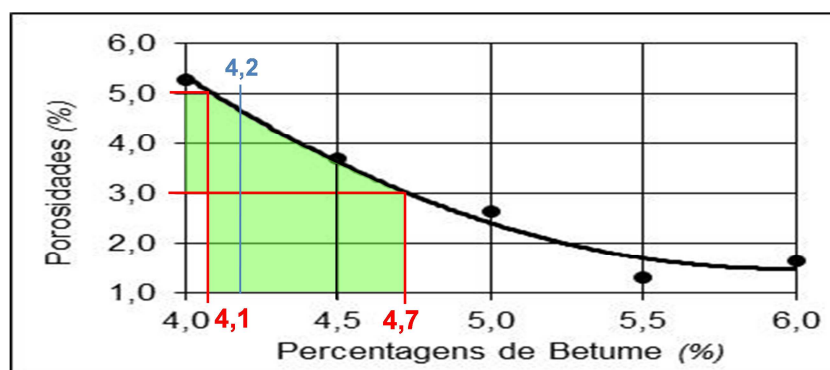


Figura 55 – Gráfico das porosidades e intervalos impostos pelo CEEP

Com as percentagens de betume calculadas poderemos fazer uma estimativa dos valores previsíveis da extensão de fadiga e módulo de rigidez. Para tal, recorrendo aos gráficos obtidos durante este estudo e que registam a evolução dos valores de módulo e fadiga com a percentagem de betume (Figura 56), poderemos estimar extensões previsíveis e os módulos correspondentes.

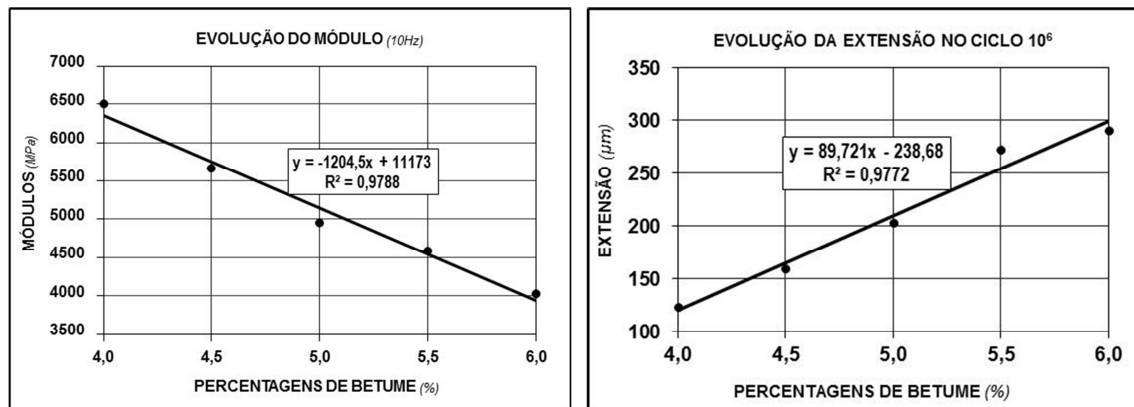


Figura 56 – Evolução do módulo e fadiga com a percentagem de betume

Utilizando as fórmulas das linhas de tendência dos gráficos que mostram a evolução do módulo de rigidez e da extensão por fadiga (Figura 56) e as percentagens de betume calculadas, poderemos estimar os seguintes valores de desempenho da mistura; com uma percentagem de betume de 4,1% teríamos um módulo de rigidez de 6235MPa e uma extensão de fadiga de 129μm e com uma percentagem de 4,2% um módulo de rigidez de 6114MPa e uma extensão de fadiga de 138μm.

Para o valor de 4,9% de percentagem de betume obtido com o método Marshall, o valor do módulo de rigidez seria de 5271MPa e a extensão por fadiga de 201μm.

Com a determinação dos três parâmetros de desempenho da mistura betuminosa (*Taxa de deformação, Módulo de rigidez e Extensão por fadiga*), poderemos chegar ao valor da percentagem de betume desejada, conseguindo-o através da imposição de qualquer um dos valores de desempenho, ou ainda do conjunto dos três valores.

Assim e de uma forma resumida, propõe-se que a formulação laboratorial de misturas betuminosas a quente (MBQ), com imposição de uma taxa de deformação, tenha a seguinte sequência de procedimento.

- 1 Selecionar os agregados e o betume
- 2 Realizar as granulometrias dos agregados

- 3 Calcular a composição percentual dos agregados para ajuste ao fuso granulométrico pretendido
- 4 Caracterizar o betume através dos ensaios de *Penetração e Anel e Bola*
- 5 Preparar os provetes utilizando a composição “farmacêutica” para cinco percentagens de betume
- 6 Calcular as pressões e número de passagens a utilizar no compactador de rolo
- 7 Moldar 16 lajetas, quatro por cada percentagem de betume
- 8 Moldar provetes para determinação da BMT
- 9 Calcular os valores da porosidade da mistura
- 10 Determinar a baridade média das lajetas por percentagem de betume
- 11 Cortar as lajetas em vigas com as dimensões 405×50×50mm (*18 vigas por percentagem de betume*)
- 12 Após massa constante, medir, pesar e determinar a baridade imersa de cada uma das vigas
- 13 Agrupar em 3 grupos de 6 vigas por cada percentagem de betume. Cada grupo deverá ter o valor médio de baridade idêntico
- 14 Submeter as vigas a ensaios de módulo e fadiga
- 15 Moldar 10 lajetas, duas por cada percentagem de betume, com dimensões de 305×305×50mm. Os valores das baridades a utilizar na moldagem serão os obtidos no ponto 10
- 16 Ensaiar as lajetas à deformação permanente (*WT*)
- 17 Calcular a percentagem ótima de betume através da equação dos gráficos WTS_{air} , recorrendo à equação da linha de tendência e conhecendo o valor da taxa de deformação máxima imposta
- 18 Verificar se o valor da percentagem ótima de betume satisfaz os valores da porosidade referenciados no caderno de encargos
- 19 Estimar os valores de módulo de rigidez e extensão de fadiga ao ciclo 10^6 , recorrendo à linha de tendência dos gráficos resultantes dos respetivos ensaios

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sendo dado como certo que não existe uma percentagem de betume exata, que garanta todas as exigências funcionais de uma determinada mistura betuminosa, procurou-se no presente estudo determinar uma percentagem de betume que melhor cumpra as diversas exigências requeridas. Para a formulação de uma determinada mistura betuminosa deve-se ter em conta a finalidade e condições de colocação em obra. Neste estudo é proposto um método de compactação laboratorial que simula as condições verificadas em obra. O método de formulação proposto foi validado através da avaliação do comportamento, em termos de propriedades fundamentais, de provetes moldados em laboratório e recolhidos em obra.

5.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo a elaboração de uma proposta para um novo método de formulação de Misturas Betuminosas a Quente (MBQ). O estudo desenvolvido baseou-se no método Marshall, recomendada pelo Anexo A da NP EN 13108-1, que opta por uma abordagem empírica, e teve em consideração a recomendação expressa na mesma norma de se ir adquirindo experiência nos ensaios baseados no desempenho das misturas betuminosas. O objetivo desta última opção é o de se enveredar pelo uso cada vez mais generalizado da abordagem fundamental para especificar o betão betuminoso.

Foi usado como método de compactação o compactador de rolo, pelo facto de ser este o tipo de compactação que mais se aproxima do tipo de compactação efetuada em obra, como foi possível evidenciar neste trabalho. Este tipo de compactação veio mostrar as suas vantagens, em relação ao método empírico Marshall, as quais se podem sumarizar nos seguintes pontos:

- O método proposto inclui a realização de ensaios que se baseiam nas propriedades fundamentais de desempenho das misturas;
- O processo de compactação realizado em obra é adequadamente simulado pelo método do compactador de rolo, dando representatividade aos provetes moldados quando comparados com os recolhidos em obra;
- O método de compactação estudado não apresenta limitação da dimensão máxima do agregado a utilizar na fabricação dos provetes;

- Com o aumento significativo da dimensão dos provetes moldados com o compactador de rolo, reduziram-se as dificuldades existentes no controlo da temperatura no fabrico dos provetes pelo método Marshall;
- A baridade, e consequentemente a porosidade, poderão ser estimadas em laboratório controlando a vibração, cargas e números de passagens a aplicar durante a compactação no compactador de rolo. Os valores conseguidos em laboratório poderão servir de indicação dos tipos de equipamentos a utilizar em obra;
- Os parâmetros de controlo da qualidade em obra poderão ser facilmente relacionados com o estudo laboratorial efetuado;
- O número de percentagens de betume a utilizar no estudo poderá reduzir-se a quatro, dispensando-se a de maior percentagem de betume estimada, uma vez que o seu comportamento no ensaio de WTT é muito irregular;
- Como se baseia nas propriedades de desempenho das misturas betuminosas, o método proposto torna-se adequado perante novas exigências e para novos materiais a aplicar em pavimentos rodoviários;
- Verificou-se que a distribuição das partículas nos provetes compactados com o compactador de rolo apresenta um arranjo semelhante aos dos provetes colhidos em obra, diferenciando-se dos compactados com o compactador de impacto (Marshall);
- A determinação dos módulos de deformabilidade em provetes cilíndricos por tração indireta, efetuada nos três tipos de provetes, evidenciou a proximidade de valores entre os provetes de obra e os moldados com o compactador de rolo, sendo ao mesmo tempo muito diferentes dos moldados com o compactador de impacto, mostrando a mais-valia do método proposto;
- Nos ensaios de determinação da resistência conservada e da sensibilidade à água, os provetes moldados com o compactador de rolo não evidenciaram alteração da resistência mecânica na força de rotura Marshall nem na compressão diametral. Registaram uma relação de valores de 100%, em diferentes condições de ensaio e perante ensaios normalizados. Por outro lado, nas mesmas condições, os provetes compactados com o compactador de impacto sofreram reduções na ordem de 15%;
- A percentagem ótima de betume é determinada com base num desempenho específico das misturas betuminosas, nomeadamente no seu comportamento à deformação permanente, avaliado em ensaios de Wheel-Tracking;

- Existe a possibilidade em estimar valores de referência do desempenho duma Mistura Betuminosa tais como:
 - Módulo de Rigidez
 - Extensão por fadiga
 - Determinação da profundidade de textura (*superior a 0,35mm*) pelo método volumétrico da mancha ($\geq 0,7\text{mm}$ para um AC 14 Surf)
 - Resistência ao deslizamento (*Medição do coeficiente de atrito através do Pendulo Britânico*)
- A percentagem ótima de betume é determinada com base num desempenho e poderá simultaneamente ser estabelecida tendo em consideração os seguintes parâmetros:
 - A zona climática de aplicação da mistura
 - A velocidade de projeto
 - A carga tipo por eixo dos veículos previstos circular
- Devido à simulação das características dos equipamentos de compactação usados em obra, como vibração, cargas a aplicar e número de passagens, numa fase posterior, de maior domínio da técnica, poderá ser dispensável a execução de trechos experimentais.

Durante a execução do presente estudo não foram reconhecidas quaisquer inconvenientes na utilização deste método. No entanto há que referenciar situações como:

- O tempo para a execução dum estudo semelhante ao desenvolvido neste trabalho será mais demorado que um estudo de formulação Marshall, pois envolve um percurso mais variado de ensaios e mais equipamentos específicos
- Os equipamentos a utilizar num estudo de compactação desta natureza poderão ser indicados como inconvenientes devido ao seu elevado custo, mas esse fator dependerá sempre da perspetiva do observador no que respeita ao custo/benefício

Como conclusão final, reconhece-se muito vantajosa o método proposto neste estudo pois baseia-se em objetividades para determinação dos resultados e utiliza um método de compactação muito aproximado da realidade da obra.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em relação à continuação dos estudos iniciados neste trabalho recomenda-se face aos resultados obtidos, linhas de orientação sobre os seguintes pontos:

- Uma diversidade maior de amostragem, favorecendo assim a representatividade do método proposto, sendo importante prosseguir os estudos de investigação neste campo de uma forma sistemática, alargando-o a um maior número de tipos de misturas betuminosas com as mais diversas aplicações;
- Numa perspetiva de otimização do método de formulação deverá ainda ter-se em consideração fatores como a introdução de novos materiais, naturais ou não, e de aditivos no betume ou nos agregados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas [APORBET] (1998). *Misturas Betuminosas: Contribuição para a normalização do fabrico e da aplicação*. Lisboa, Portugal.
- Azevedo, M. (1993). *Características mecânicas de misturas betuminosas para camadas de base de pavimentos*, Dissertação submetida à Universidade Técnica de Lisboa - IST para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, IST, Lisboa, Portugal.
- Capitão, S. D. (2003). *Caracterização mecânica de misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade*, Dissertação submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Coimbra, Portugal
- CEPSA. (2007). *Manual de Pavimentos*. Acedido em 2012, em http://www.cepsa.com/stfls/CepsaPt/O%20Que%20Oferecemos/Produtos%20Asf%20C3%A1lticos/Ficheros_Produtos%20Asf%20C3%A1lticos/Manual_Pavimentacao_Web.pdf.
- Cooper, (2011). *Operation and Maintenance Manual. The Roller Compactors: CRT-RC, CRT-RC2S, CRT-RCV, CRT-RC2SV*. Cooper Research Technology Ltd.
- Delorme, J.L., Roche, C. & Wendling, C. (2007) *LPC Bituminous Mixtures Design Guide*. The RST Working Group, "Design of bituminous mixtures ", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Acedido em 2013, em http://www.aapaq.org/q/2012st/doc/REF/F09_Manual_LPC_Bituminous_Mixtures_Design_Guide.pdf
- EP - Estradas de Portugal, SA [EP]. (2012). *Caderno de Encargos Tipo Obra*. Almada, Portugal.
- Francken, L, (1998). *Bituminous, Binders and Mixtures, State of the Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design*. Report 17, RILEM. Londres, Reino Unido.
- Freire, A., (2002). *Deformações permanentes de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários*, Dissertação submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Coimbra, Portugal.

- Hunter, A.E., Airey, G.D., & Collop, A.C. (2004) *Effect of asphalt mixture compaction on aggregate orientation and mechanical performance*. Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04). 12 – 16 September 2004 Sun City, South Africa, Acedido em 2013, em <http://asac.csir.co.za/capsa/Documents/057.pdf>
- Instituto das Infraestruturas Rodoviárias [INIR] (2013) *Construção e Reabilitação de Pavimentos. Ligantes Betuminosos*. Disposições Normativas. Instituto das Infraestruturas Rodoviárias I.P. Acedido em 2013, em: <http://www.inir.pt/portal/LinkClick.aspx?fileticket=cU2qC8H9SfU%3D&tabid=116&mid=487&language=pt>
- Instituto de Estradas de Portugal [IEP]. (1998). *Caderno de encargos-tipo para a rede rodoviária nacional*.
- Micaelo, R. (2008). *Compactação de Misturas Betuminosas. Ensaios de campo e modelação numérica.*, Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia do Porto para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Porto, Portugal.
- Neves, J. (2001). *Contribuição para a Modelação do Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis.*, Dissertação submetida à Universidade Técnica de Lisboa - IST para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, IST, Lisboa, Portugal.
- Oregon State University [OSU]. (2012) *Mix Design. Marshall Method*. Pavement Structures. Classes - Civil and Construction Engineering. Winter 2012. Acedido em 2012 em: http://classes.engr.oregonstate.edu/cce/winter2012/ce492/Modules/05_mix_design/05-4_body.htm
- Pais, J., Pereira, P. & Azevedo, M. (2000). *Ensaios mecânicos para caracterização de misturas betuminosas*, Estrada 2000: 1º Congresso Rodoviário Português, Centro Rodoviário Português, Lisboa. Acedido em 2013, em <http://hdl.handle.net/1822/16565>
- Palha, C. (2008) *Protocolo para a realização de ensaios de tração indireta para determinação do módulo de deformabilidade de misturas betuminosas*. Documento interno, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Pavement Interactive (2008). Marshall Mix Design. 23 de julho de 2008. Acedido em 2012, em <http://www.pavementinteractive.org>

- Picado Santos, L. (1994). *Consideração da temperatura no dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis*, Dissertação submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia. da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Doutor em Eng.^a Civil. Coimbra, Portugal.
- Picado Santos, L. (2012). *Formulação de Misturas Betuminosas*. Slides de apresentação do Grupo de Investigação em Vias de Comunicação. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Acedido em 2012.
- Picado Santos, L. (2013). *Misturas Betuminosas. Formulação de misturas betuminosas*. Slides de apresentação da disciplina de Vias de Comunicação do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura do Instituto superior Técnico. Acedido em 2013, em https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/736819/1/VC_Misturas%20Betuminosas_Formulacao_Aula16.pdf
- Quaresma, L., Freire, A. & Ferreira, P. (2000). *Consideração do comportamento visco-elástico das misturas betuminosas na previsão das deformações permanentes de pavimentos rodoviários*, Estrada 2000 – 1º Congresso Rodoviário Português, Centro Rodoviário Português, Lisboa, Portugal. 717-730.
- Swiertz, D., Mahmoud, E. & Bahia, H. (2010) *Asphalt Mixture Compaction and Aggregate Structure Analysis Techniques: State of the art*. Acedido em 2013 em http://uwmarc.wisc.edu/files/rilemtg2/State_of_the_Art_Report_with_Imaging_Standard_Jan2010.pdf
- The Asphalt Institute. (1971) *Asphalt Technology and Construction, Instructor's Guide*; Maryland, USA.
- Transportation Research Board [TRB]. (2011). *A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary*. NCHRP Report 673 Washington, D.C, EUA.
- Travé, G. M. G. (2012). *Análisis comparativo del comportamiento mecánico de mezclas betuminosas. Normativa NLT-Normativa UN-EEN*. Dissertação submetida à Universidade de Granada para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil e Arquitetura. Granada, Espanha.
- Murphy, T. R. & Bentsen, R. A. (2001). *Marshall Mix Design*. Getting the Most out of your Marshall Mixes. Norridge, Reino Unido.

Normas

EN 933-1;2012 Análise granulométrica, método da peneiração

NP EN 1426;2010 Penetração de um betume

NP EN 1427;2010 Temperatura de amolecimento de Anel e Bola

EN 12697-5;2009 Determinação da Baridade Máxima Teórica

EN 12697-6;2012 Determinação da Baridade imersa

EN 12697-8;2003 Vazios na Mistura de Agregados (VMA)

EN 12697-12;2008 Sensibilidade à água

EN 12697-22;2007 Wheel Tracking Test (Resistência à deformação permanente)

EN 12697-23;2012 Resistência à Tração Indireta

EN 12697-24;2012 Resistência ao fendilhamento por fadiga

EN 12697-26;2012 Módulo de Rigidez

EN 12697-29;2002 Determinação das dimensões de provetes betuminosos

EN 12697-30;2012 Provetes compactados com o compactador de impacto

EN 12697-33;2003 Provetes compactados com o compactador de rolo

EN 12697-34;2012 Ensaio Marshall

NP EN 12697-35;2004 Métodos de ensaio para Misturas Betuminosas a Quente

NP EN 13108-1;2011 Anexo A Formulação de Misturas Betuminosas

NLT-173;1984 Resistência a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratório